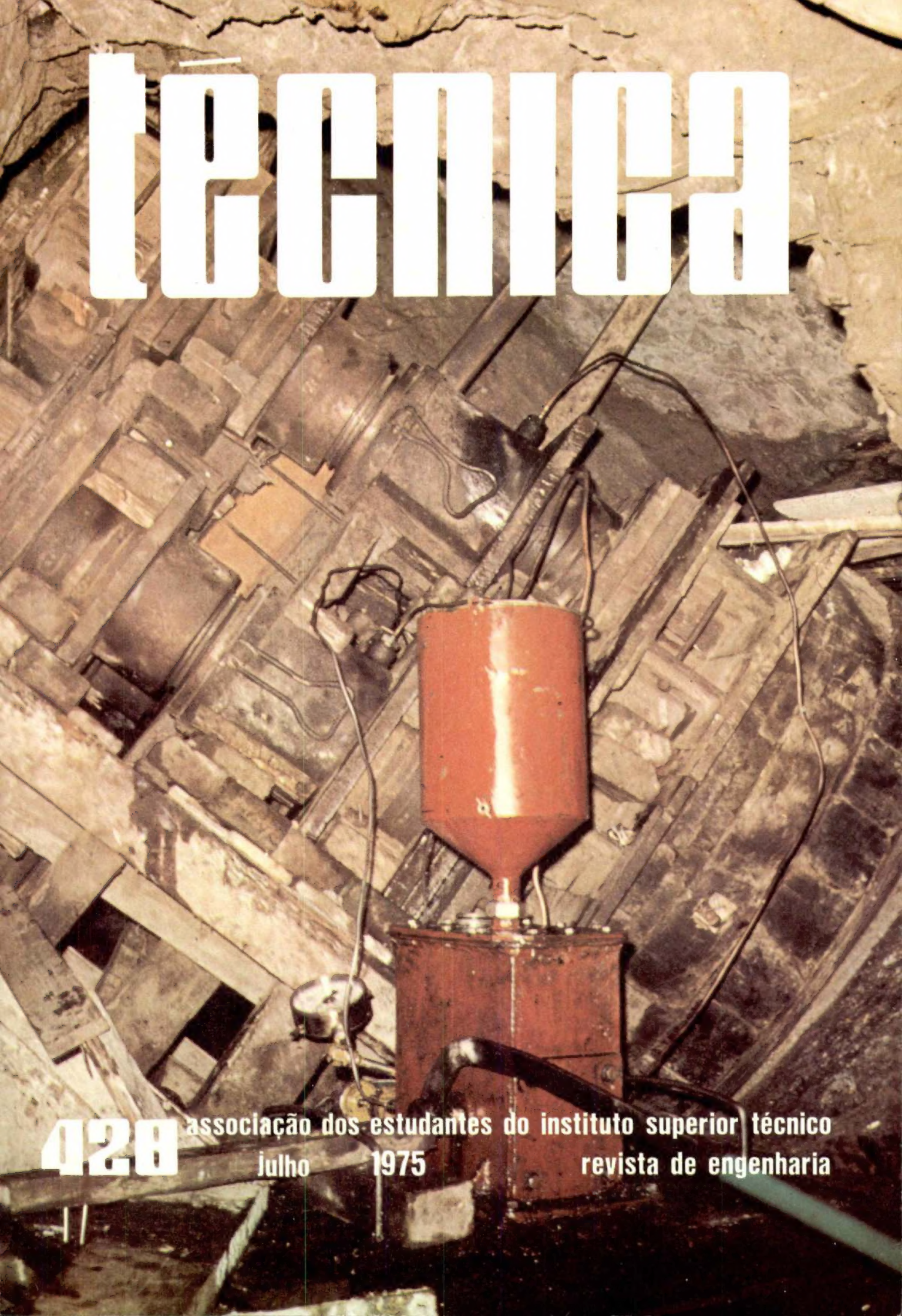
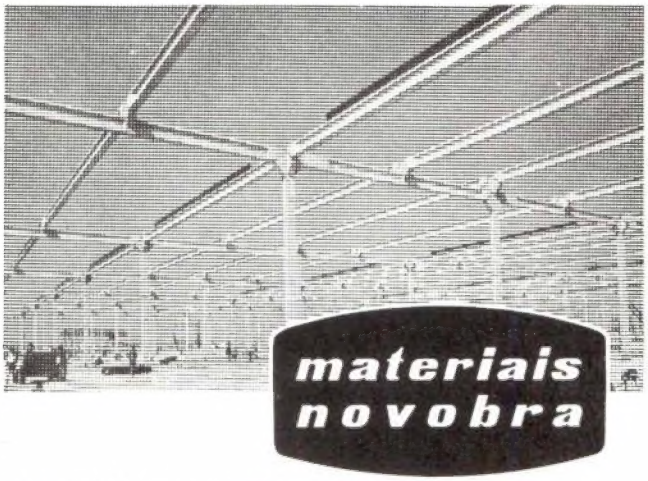
# técnica



428 associação dos estudantes do instituto superior técnico
julho 1975 revista de engenharia

# PÓRTICOS DE GRANDE VÃO

Pórticos até 22,00 m de vão e pilares até 9,00 m de altura, afastados de 12,00 m no interior e de 6,00 m no perimetro exterior. As fundações são minimas devido ao baixo peso da estrutura ( ≃ 60 kg/m2). São possiveis adaptações para pontes rolantes.




**A mais vasta gama em pré-fabricados de betão**

Pré-fabricação total ou parcial · Pavimentos · Coberturas · Asnas · Perfis especiais
Post-Esforço «Losinger» · Pontões · Vigas de grande vão · Pórticos «Crendon»
Pórticos «Guiraudie & Auffeve» · Pavimento «Trief» · Protecção de segurança «Trief»
Mosaicos · Garagens · Tubos · Blocos de Leca · Espaçadores de Betão
Estacas para Vinhas e Pomares · Travessas para Caminhos de Ferro

Fábricas em: Lisboa, Leiria, Lagoa, Guarda, Moita, Luanda e Lourenço Marques
Stands de exposição em: Aveiro, Évora e Faro
Sede: Av. Est. Unidos da América, 100, 5.º - Dto. – Lisboa 5
Telefones – Serviços Administrativos: 77 48 32 - 77 29 53 · Telex: 18375 Novoba P
Serviços Técnicos: 71 41 16/7/8 - 71 93 31/2

**CONSTRUA COM CONFIANÇA - CONSULTE-NOS**



# UNIÃO ELÉCTRICA PORTUGUESA

S. A. R. L.

SEDE

**Rua de Alexandre Herculano, 244 — PORTO**

TELEFONES: 2 76 76 / 77 / 78 / 79 — Est. 90

DELEGAÇÃO

**Rua Rosa Araújo, 35 — LISBOA**

TEL.: 73 11 81/82/83/84/85/86 - 73 33 33 - 48 491

●

**ELECTRICIDADE DO LINDOSO
E DAS CENTRAIS DO FREIXO
E DA CACHOFARRA**

●

A **UNIÃO ELÉCTRICA PORTUGUESA** distribui, pela mais extensa rede de alta tensão em Portugal (cerca de 2 500 km), energia eléctrica em 70 concelhos, nos distritos de VIANA DO CASTELO, BRAGA, PORTO, AVEIRO, COIMBRA, VISEU, LEIRIA, SETÚBAL e ÉVORA.

**Carnaxide — Tel. 219 00 37**

técnica

NÚMERO 428 JULHO DE 1975 ANO L VOLUME XXXVII PUBLICAÇÃO MENSAL

DIRECTOR
José de Oliveira Paulo

CHEFE DE REDACÇÃO
Rogério Caldas Pinto

ADMINISTRADOR
Delmar Baptista

SECRETÁRIO
António Maria da Fonseca

REDACTORES
José Agostinho Marques
Jorge Braz
Armando Ruano
Manuel M. S. Anastácio

DIRECÇÃO, REDACÇÃO E ADMINISTRAÇÃO
Av. Rovisco Pais, I. S. T. — Lisboa
Telefone 72 93 23

PROPRIETÁRIO
A. E. I. S. T.

★

| ASSINATURAS: | 5 n.os | 10 n.os |
|---|---|---|
| Continente e ilhas | 140$00 | 250$. |
| Países de língua Portuguesa e Espanha | 150$00 | 270$. |
| Estrangeiro ..... | — | 300$. |
| Número avulso | — | 35$. |

Não se publica em Agosto e Setembro.

Os artigos assinados são da exclusiva responsabilidade dos autores.

★

COMPOSIÇÃO E IMPRESSÃO:
*MOVIGRÁFICA*
Rua do Espírito Santo, 19-A - Odivelas

# SUMÁRIO

369 — J. LAGINHA SERAFIM e MARCIANO L. GUERREIRO — *Ensaios de Fundações rochosas de Barragens e seu Comportamento.*

*Tests and Observed Behaviour of Rock Fundations of Dams.*

383 — J. J. DELGADO DOMINGOS e M. TERESA PONTES — *Um modelo Gaussiano para a dispersão de poluentes na atmosfera.*

*An air pollution Gaussian diffusion model.*

389 — IRIARTE JOSÉ ARAÚJO ESTEVES e JOSÉ ALBERTO TEIXEIRA — *«Cepstrum» (¹) Estudo experimental da sua aplicação ao sinal falado. «Vocoders».*

*«Cepstrum» Aplication to speech analysis. «Vocoders».*

409 — J. J. AMARANTE DOS SANTOS — *Um programa para o traçado de curvas de nível em pequenos calculadores.*

*A program for contour drawing in mini-calculators.*

CAPA — *Ensaio de deformabilidade do maciço rochoso de fundação da barragem de Gran Suarna, no interior de uma galeria em duas áreas inclinadas opostas de 2 m², usando quatro macacos de 300 t.*

(V. artigo de J. LAGINHA SERAFIM).

# ÍNDICE ALFABÉTICO DOS ANUNCIANTES


| | pág. |
|---|---|
| Construções Técnicas | VI |
| Construções Schréder | 2.ª da capa |
| EFACEC | IX |
| Electrotécnicos Reunidos | X |
| Electro-Arco, Lda. | IV |
| Empresa Técnica de Equipamentos Eléctricos | VIII |
| Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações | VII |
| Fanafel | VII |
| Ferrunil | II |
| MAGUE | V |
| Novobra, Lda. | 2.ª da capa |
| Sociedade Portuguesa Cavan | IV |
| S. K. F., Lda. | III |
| Sondagens e Fundações A. Cavaco | II |
| Sopecate | II |
| União Eléctrica Portuguesa | 2.ª da capa |

# Já pensou...

... que o seu anúncio
é muito eficaz se for
publicado na revista que
os seus clientes lêem?
Os milhares de exemplares
de cada número da nossa revista
são lidos por engenheiros
e técnicos, por pessoas ligadas
à indústria, à investigação, ao
ensino, pelos seus clientes,
em suma. Consulte-nos

técnica REVISTA DE ENGENHARIA

Avenida Rovisco Pais • Lisboa 1 • Telef. 72 93 23

fundações
sondagens

**Sopecate**

especialista há ‡1/4‡ de século

rua do arsenal, 146-2º tlf 36 40 10 · Lisboa

**FERRUNIL**
CONSTRUÇÕES METÁLICAS INDUSTRIAIS, LDA

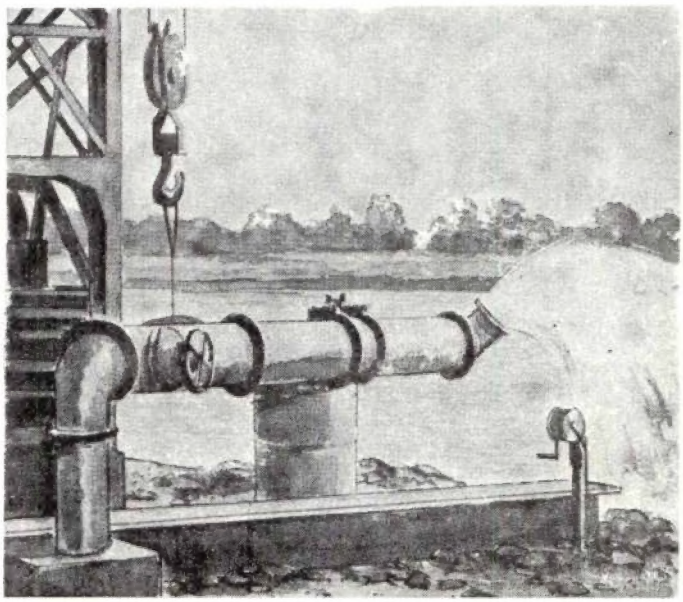
ESTRUTURAS - RESERVATÓRIOS
VIGAMENTOS - SILOS
PONTES ROLANTES
EQUIPAMENTO INDUSTRIAL

COBERTURAS PARA:
ARMAZÉNS
UNIDADES INDUSTRIAIS
HANGARES
PAVILHÕES DESPORTIVOS, ETC.

FÁBRICA:
Trajouce ..... 244 0230
244 0256

ESCRITÓRIOS:
Av. Elias Garcia, 162, 2º E (L1) *77 77 96
*77 77 97
*77 75 29
LISBOA *77 26 35

**Água:**
**eis o que lhe oferecemos!**



- Pesquisas e captações de água
- Estudos hidrogeológicos
- Sondagens e Fundações
- Rebaixamento de níveis aquíferos

**ACAVACO**

R. Rodrigo da Fonseca, 62, r.c-Esq. - Lisboa-1
Tel. 56 11 71/2/3/4

# SKF

A SKF não tem apenas rolamentos de esferas e de rolos .

Temos também rolamentos de agulhas

rótulas e embutes .

Evidentemente, temos do mesmo modo toda a espécie de acessórios para rolamentos.

Além disso a SKF fabrica muitos outros produtos de qualidade.

Rodas e carretos cónicos, por exemplo

Fusos roscados de rolamento de alta precisão que transformam o movimento de rotação em linear.

Fabricamos também machos cassonetes

e brocas .

O mesmo se passa com pontos rotativos .

E muitos sabem que também temos um bom Serviço Técnico.

SOCIEDADE SKF LIMITADA

LISBOA - PRAÇA DA ALEGRIA, 66-A
TELEF.: 362301 - TELEGR.: ESKAEF - TELEX: 12156

PORTO - RUA DELFIM FERREIRA, 604
TELEF.: 692054 - TELEGR.: ESKAEF

Av. Visconde Valmor, 76-1.º - Tel. 766014 (7 linhas) Lisboa-1

ELECTRO-ARCO, S.A.R.L.

- FABRICANTE DE ELÉCTRODOS E ARAME PARA SOLDADURA AUTOMÁTICA
- EQUIPAMENTO PARA SOLDADURA ELÉCTRICA E OXI-ACETILÉNICA
- ACESSÓRIOS

★

MATERIAL APROVADO POR
*AMERICAN BUREAU OF SHIPPING*
*BUREAU VERITAS*
*DET NORSKE VERITAS*
*GERMANISCHER LLOYD*
*INSTITUTO DE SOLDADURA*
*LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING*

★

SEDE, FÁBRICA E LABORATÓRIOS
Rua Vice-Almirante Azevedo Coutinho, 4
VENDA NOVA — AMADORA
Telefs. 97 63 21 - 97 17 33 - 97 64 71 - 97 06 13
DELEGAÇÃO NO NORTE
Rua Delfim Ferreira, 525
PORTO
Telef. 6 21 24

# Topografia Geral

**2.º VOLUME**

Pelo Engenheiro

## A. C. XEREZ

Preço de cada volume

**180$00**

•

Desconto: 10% aos assinantes

Pedidos à Técnica

técnica

NÚMERO 428 JULHO DE 1975 ANO L VOLUME XXXVII PUBLICAÇÃO MENSAL

C. D. U. 624.131.388:627.82

# Ensaios de fundações rochosas de barragens e seu comportamento

J. LAGINHA SERAFIM
Prof. FST, UC., Eng.º Civil (IST)
MARCIANO L. GUERREIRO
Eng.º Civil (IST)

SUMÁRIO

*Este trabalho apresenta os resultados dos esforços de vários anos para interpretar ensaios de deformabilidade de fundações rochosas de barragens de betão. Os resultados de ensaios de deformabilidade «in situ» dependem da direcção e profundidade dos pontos ensaiados e das condições geológicas do local, sendo muito claras as correlações com a profundidade e inclinação das formações. São discutidos os métodos de interpretação usados e feitas comparações com resultados obtidos em laboratório, sendo apresentados os resultados de diversos ensaios «in situ» em diferentes rochas. Indicam-se novos factos sobre os efeitos da injecção na deformidade agora encontrados e dão-se informações recentes sobre o comportamento das fundações em rocha, baseadas em observações com medidores de extensões de grande comprimento (extensometros).*

SUMMARY

*The paper presents results of many year's efforts to interpret deformability tests of foundation rocks of concrete dams. Results of «in situ» deformability tests depend on the direction, depth of tests and the geological details of the site. Correlations with depth and dip and strike of the formations are very clear. Methods of interpretation used and comparisons with laboratory results are discussed and results of many tests at site in various rocks are presented. New findings on the effects of grouting in deformability are indicated and the most recent information is given on rocks foundation behaviour, based on observation with long length strain meters (extensometers).*

## INTRODUÇÃO

No projecto de grandes barragens de betão, é de importância básica o conhecimento da deformação da fundação devida às cargas impostas pela barragem, pela pressão da água intersticial e por outros efeitos. Um conhecimento da resistência ao corte da fundação é também essencial, especialmente ao longo das superfícies de resistência mínima. Tem havido progressos nesses dois campos experimentais da Mecânica das Rochas, mas os métodos de ensaio mais seguros continuam a ser semelhantes àqueles que se desenvolveram há duas décadas. Como exemplos temos os ensaios com macacos dentro de galerias e os ensaios de compressão triaxial em laboratório. Contudo, tais métodos tornaram possível a descoberta de muitos aspectos do comportamento mecânico de maciços rochosos, que muito contribuiram para os conhecimentos neste campo. No caso das determinações de deformabilidade, em granitos, os primeiros resultados indicaram variações muito importantes com o grau de alteração (que no geral diminui com a profundidade) e com o grau de compressão natural e mostraram também variações com a direcção, principalmente em ensaios no laboratório de amostras do material rocha [1]. Tornou-se então evidente que era necessária uma interpretação mais pormenorizada dos resultados.

Os ensaios tradicionais «in situ» com macacos, em galerias, usados pelos autores para determinar a deformabilidade, incluem ciclos de carga sucessivamente crescentes, até uma tensão normal máxima superior à imposta pela barragem às suas fundações e a repetição dos ciclos de carga e descarga até esta tensão. Geralmente, o «módulo de elasticidade» do maciço rochoso, «E», é tomado como a relação entre essa tensão máxima, $\sigma$ e a média das deformações máximas, $\delta$, observadas nos ciclos repetidos, durante a carga, no centro da área carregada [2]: «E» $= \sigma\, d\, (1 - \nu^2) / \delta$, onde d é o diâmetro da área em carga e $\nu$ o coeficiente Poisson da rocha. Este «módulo de elasticidade» é calculado supondo que o corpo é um sólido semi-infinito, elástico, contínuo, homogéneo e isotrópico. A razoável aproximação de tais considerações tem sido verificada, mas pode ser posta em dúvida [3], [4]. Considera-se que a justificação para estas afirmações terá de vir também da observação directa do comportamento das fundações das barragens.

Todos estes anos de estudo da Mecânica das Rochas têm conduzido a uma visão coerente do comportamento dos maciços rochosos. Ao estudar os diagramas de tensão-deformação em ciclos de carga e descarga dos ensaios «in situ» e ao considerar a existência de fissuras finas, foi-se conduzido a propôr para os maciços rochosos um «modelo de esponja» que explica: (a) o assentamento progressivo observado nos ciclos sucessivos de carga e descarga; (b) o aumento do «módulo de elasticidade» tangente com carga crescente até uma determinada tensão (quando começa a ruptura); (c) o «módulo de elasticidade» tangente muito mais alto quando começa a descarga, etc.

Os resultados dos ensaios triaxiais em laboratório [1] têm também posto em relevo não só os aspectos (b) e (c), mas ainda que a deformabilidade de uma amostra para a mesma tensão axial diminui bastante com a pressão confinante, o que é também considerado um efeito do fecho das microfissuras. Em tais ensaios, o «módulo de elasticidade», «E», é considerado como a relação entre a tensão axial total e a extensão longitudinal correspondente, apesar de se saber que se trata de sólidos anisotrópicos.

Em comunicações recentes [2], [4], [5], os autores têm indicado os esforços feitos no sentido de uma interpretação racional dos resultados dos ensaios «in situ» e de encontrar maneiras mais eficientes para determinar a deformabilidade dos maciços rochosos. O propósito principal deste trabalho é o de relatar a continuação destes esforços, apresentar resultados de ensaios recentes e indicar valores provenientes da interpretação de medições de extensões em fundações das barragens em serviço. Também se apresenta um relato pormenorizado do método de interpretação dos ensaios, agora usado.

Entre os resultados mais importantes obtidos estão os que indicam, sistematicamente, para todos os locais de barragens, o aumento dos «módulos de elasticidade» dos maciços rochosos com a profundidade. Torna-se claro que a descompressão, a alteração da rocha e a fissuração mais intensa junto da superfície são factores primários determinando valores baixos dos «módulos de elasticidade» dos maciços rochosos nesta zona. Contudo, a deformabilidade de um dado maciço rochoso num determinado local parece atingir um limite a partir de uma certa profundidade, se não houver modificação no grau de alteração, embora não seja igual para todas as direcções. A composição mineral, a matéria pétrea, a porosidade e as microfissuras da rocha também influenciam, evidentemente, as propriedades do maciço rochoso. Mesmo em granitos se tem notado que os planos das microfissuras têm uma orientação preferencial no material rocha [1].

Sendo os maciços rochosos meios discontínuos (devido à existência de fissuras, falhas, xistosidade, planos de estratificação, etc.), como resultado imediato, o material tem um comportamento anisotrópico especial. As condições de sedimentação, as tensões tectónicas desviatórias e variáveis, o metamorfismo, a fracturação devida a tensões internas, sismos ou explosões, a recristalização e outros factores também contribuem, de modo muito importante, para a variação das propriedades com a direcção. Os autores têm frequentemente chamado a atenção para o facto dessa anisotropia não poder ser assimilada a qualquer dos modelos matemáticos melhor estudados de materiais anisotrópicos da Teoria da Elasticidade. As tentativas de interpretação dos dados obtidos, quer em ensaios de campo em galerias quer no laboratório, supondo, por exemplo, um comportamento ortotrópico, monotrópico, ou isotrópico transverso, têm falhado nos casos de formações xistosas ou de camadas sedimentares [2], [6]. Os resultados das medições de extensões em diversas direcções em várias amostras tiradas em ângulos diferentes de um local e ensaiadas triaxialmente não estão de acordo uns com os outros (são incompatíveis se a rocha se suposer contínua), indicando que as características anisotrópicas duma mesma rocha mudam conforme a amostra, a direcção e o tipo das cargas [7]. Este problema é esclarecido neste trabalho.

Em tentativas de interpretação da anisotropia dos maciços rochosos a partir dos resultados de ensaios «in situ» na mesma zona, os cálculos baseados na isotropia transversal levaram à conclusão que os valores dos módulos de elasticidade que poderiam ser deduzidos são muito próximos dos calculados ao assumir isotropia perfeita. Isto deu uma razão para aceitar os cálculos tradicionais dos resultados dos ensaios «in situ» atrás referidos [8].

Considerando os resultados dos ensaios mencionados, parece muito importante fazer notar que as constantes de deformabilidade e os parâmetros de anisotropia dum maciço rochoso não dependerão apenas do próprio maciço (material, textura, estado de tensão, grau de descompressão devido à excavação, etc.), mas também das tensões impostas ao maciço durante os processos de carga e descarga e a sua sucessão.

Para as diversas direcções da carga, a possibilidade de deslizamentos, ao longo de superfícies de microfissuras, planos de xistosidade, ou planos de clivagem de cristais orientados, determina que a deformabilidade máxima ocorra quando a direcção da carga e o ângulo de atrito interno dessas superfícies permitem

esse deslizamento. A influência mecânica de uma falha ou de uma família de diaclases pode também ser, em grande escala, semelhante aos efeitos das microfissuras. Neste trabalho mostra-se que a orientação das microfissuras e, esjecialmente, o deslizamento que nelas pode ocorrer, é de importância primária no comportamento «anisotrópico» observado em amostras de laboratório. A geometria do corpo carregado é evidentemente básico para permitir, ou não, tal deslizamento. Torna-se também razoável aceitar que os estados de tensão (interna) existentes na textura antes da carga e descarga influenciam este comportamento. Em determinados casos e para certos ângulos de tensões máximas, o deslizamento não pode ocorrer e, neste caso, a deformabilidade é mínima.

O modelo de deformação por deslizamento já foi sugerido para fissuras finas de Griffiths ([9]), ([10]), mas parece que se poderão vir a desenvolver teorias mais complexas. Espera-se que o conhecimento experimental aqui indicado contribua para estabelecer um modelo matemático razoavelmente correcto para a deformabilidade de maciços rochosos

pondentes de «E» num modelo isotrópico, isto é aos valores de «E» indicados no diagrama central da fig. 1 para $\alpha = 0°$ e $\alpha = 90°$, para os mesmos valores do parâmetro $\underline{C}$ (ver artigo seguinte). Os valores determinados de ambas as formas são comparados no quadro seguinte.

Estes resultados estão de acordo com a ideia que, para a fase de projecto (no caso de Las Portas), a realização de ensaios com as medições necessárias para determinar os valores de $\underline{E}$ e $\underline{E'}$ (considerando a monotropia) irá, na prática, conduzir aos mesmos valores que os que implicam medições mais reduzidas e que podem ser interpretadas dentro da teoria mais simples da isotropia. Considera-se que esta conclusão pode ser extensível a todos os casos nos quais a anisotropia é pouco significativa, seja qual for o modelo de anisotropia.

Os ensaios, em laboratório, da resistência triaxial e da deformabilidade em amostras de rocha matriz, habitualmente considerados nos programas de estudo da deformabilidade dos maciços de fundação das barragens, têm, basicamente, o propósito de complementar os resultados dos ensaios «in situ». Foram apresentados al-

| Formação n.º | Valores de $\underline{C}$ (m) | Valores dos módulos de elasticidade (kg cm$^{-2}$) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $\underline{E}$ | $\underline{E'}$ | «E» ($\alpha = 0°$) | «E» ($\alpha = 90°$) |
| 6 | 19 | 76 000 | 55 000 | 70 000 | 52 000 |
| 1 | 24 | 61 000 | 48 500 | 90 000 | 42 000 |

## 2 — EFEITO DA DIRECÇÃO SOBRE A DEFORMABILIDADE (OU «MÓDULO DE ELASTICIDADE») DE UM MACIÇO ROCHOSO E DO MATERIAL ROCHA

A fig. 1 mostra resultados de ensaios em amostras em carga triaxial e de ensaios em galerias, em várias direcções, no local da barragem de Las Portas, em Espanha. Deixando de lado os efeitos da pressão lateral em amostras em carga triaxial, é evidente que, sendo os «módulos de elasticidade», «E», em diversas direcções, de maciços rochosos, definidos por curvas do tipo indicado nessa figura, ou mesmo do tipo indicado na fig. 4, para ensaios «in situ» ou em laboratório, a anisotropia está longe de ser do tipo monotrópico. Tal hipótese não vale, mesmo como aproximação teórica. Deve, além disso, notar-se que a anisotropia de «E» não é aquela que corresponde a curvas como as indicadas na fig. 1. De facto, os valores de «E» aí representados foram calculados usando fórmulas válidas só para sólidos isotrópicos.

No caso de Las Portas, foi demonstrado ([4]) que, para as duas formações 1 e 6, os valores E e E' do maciço rochoso, obtidos considerando um modelo monotrópico ([2]), são praticamente iguais aos valores corres-

guns resultados nos Congressos da Associação Internacional das Rochas ([5]), ([11]). Uma das conclusões práticas mais importantes obtidas da comparação entre os resultados dos ensaios em laboratório e «in situ» é que as características de deformabilidade de um maciço rochoso não podem ser avaliadas apenas através de ensaios de amostras em laboratório. Pelo contrário, podem ser cometidos erros importantes em relação aos valores dos módulos de elasticidade e da anisotropia da massa rochosa. A fig. 1 demonstra claramente essa ideia. Esta figura compara, em representação polar, a deformabilidade do maciço rochoso e da rocha matriz em amostras cilíndricas com 12 cm de altura e 6 cm de diâmetro ensaiadas uniaxial e triaxialmente. A formação em questão é um horizonte de xistos no local da barragem de Las Portas. Duas conclusões podem ser tiradas imediatamente dessa comparação:

— os valores de «E» são menores para o maciço rochoso;

— os dois tipos de ensaio mostram anisotropia diferente sendo mais acentuada nas amostras da rocha.

Para amostras com planos de xistosidade paralelas ao eixo longitudinal ($\alpha = 0°$), os valores de «E» são mais

baixos que os obtidos no caso de amostras com planos de xistosidade perpendicular aos seus eixos. Provavelmente, isto é devido ao facto das amostras dos furos paralelos à xistosidade serem mais afectados pela extracção das amostras.

Um outro aspecto importante destes ensaios resulta da geometria das amostras e dos métodos de ensaio, que modificam a verdadeira anisotropia. De facto (ver figs. 1 e 2 - I), considerando d o diâmetro da amostra e h a sua altura, o ângulo $\delta$ é dado por

$$\delta = \text{arc tg} \frac{d}{h}$$

Da fig. 2 pode-se ver que para valores de $\alpha$ tais que $0 < \alpha < \delta$, não pode haver praticamente um contributo importante para a deformação longitudinal do deslizamento ao longo dos planos de xistosidade passando através do centro do extensómetro, desde que as placas de carga nas bases das amostras evitem tal deslizamento. É óbvio que este contributo, que é inexistente quando $\alpha = 0$, aumentará na prática conforme $\alpha$ se aproxima de $\delta$, (intervalo A das cirvas da fig. 1 correspondente ao material rocha). Se o ângulo de atrito interno nos planos de xistosidade for $\beta$ para valores de $\alpha$, tais que $\beta < \alpha < \pi/2 - \beta$ ( e com $\pi/2 - \beta < \delta$), haverá teoricamente um contributo mais importante para a deformação longitudinal através do deslizamento ao longo dos planos de xistosidade que atravessam os extensómetros. De facto, nessas circunstâncias, o atrito por si só já não é suficiente para evitar o deslizamnto. Isto acontece no intervalo B das curvas da fig. 1, onde «E» é mínimo. Para valores de $\alpha$, tais que $\pi/2 - \beta < \alpha < 90°$, já não haverá teoricamente deslizamento ao longo dos planos de xistosidade, já que apenas o atrito será então suficiente para o evitar. Na prática, o contributo para a deformação do deslizamento tangencial ao longo dos planos da xistosidade diminuirá, dando azo a um aumento de «E», conforme se pode ver no intervalo C das curvas.

No caso do maciço rochoso( diagrama central das figs. 1 e 2 - II) a situação é mais fácil de explicar. De facto, haverá sempre alguns planos de xistosidade abertos através dos quais pode haver deslizamento, uma vez que as forças resistentes e o atrito forem vencidos. Assim, sempre que $\alpha$ for tal que $0 < \alpha < \pi/2 - \beta$, haverá deslizamento ao longo dos planos de xistosidade abertos. O número destes planos diminui conforme $\alpha$ se aproxima a $\pi/2 - \beta$, de modo que o contributo desse deslizamento para o deslocamento medido no centro da superfície em carga também diminui (intervalo D da curva da fig. 1 referente ao maciço rochoso) e consequentemente o «módulo de elasticidade» aumenta. Para $\alpha = \pi/2 - \beta$, teoricamente não haveria mais deslizamento, sendo o mesmo verdade para valores de $\alpha$ tais que $\pi/2 - \beta < \alpha < 90°$. Por outro lado, contudo, o contributo, para o deslocamento, do fecho dos planos de estratificação e xistosidade abertos aumentará. O intervalo E da curva corresponde àquele intervalo de $\alpha$, igual ou muito próximo de $\pi/2 - \beta$, o que de facto acontece no caso em estudo.

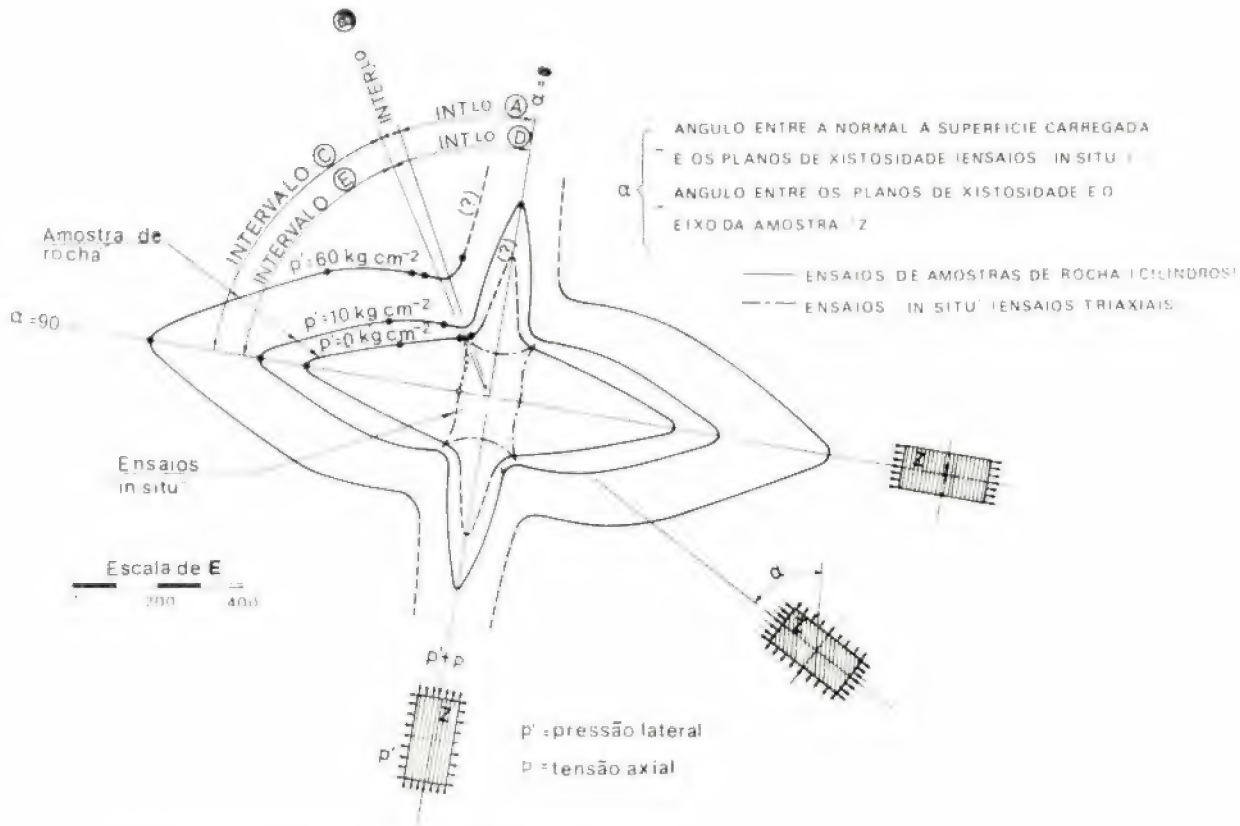
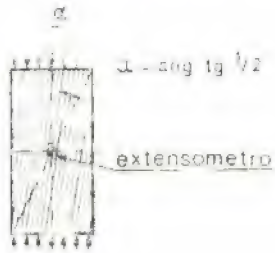
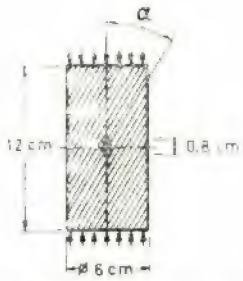



Fig.1- Comparação entre anisotropia de deformabilidade de massas rochosas e do material rocha

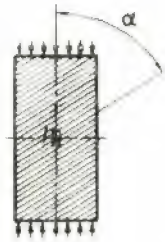
## I- ENSAIOS DE MATERIAL ROCHOSO




INTERVALO Ⓐ DE α
$0 \leq \alpha < \delta$

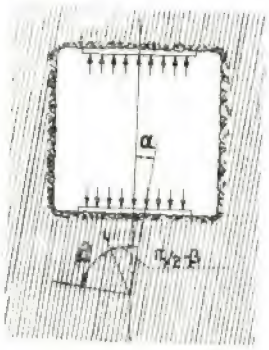



INTERVALO Ⓑ DE α
$\delta \leq \alpha \leq \pi/2 - \beta$

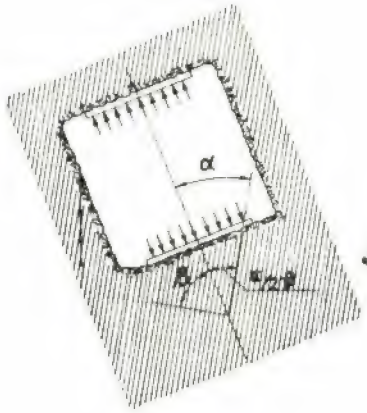



INTERVALO Ⓒ DE α
$\pi/2 - \beta < \alpha \leq 90°$

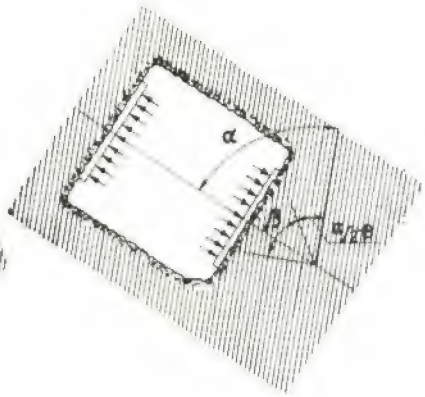
## II-ENSAIOS "IN SITU"




INTERVALO Ⓓ DE α
$0 \leq \alpha \leq \pi/2 - \beta$




$\alpha = \pi/2 - \beta$




INTERVALO Ⓔ DE α
$\pi/2 - \beta < \alpha \leq 90°$

Fig-2 Representação esquemática da influência do α na contribuição para a deformabilidade do escorregamento ao longo dos planos de xistosidade

### 3 — INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS «IN SITU» CONSIDERANDO PARÂMETROS DE DIRECÇÃO E DE PROFUNDIDADE

Para além de certas condições locais, tais como a proximidade de falhas ([1]), túneis ([5]), etc., a experiência mostra que a profundidade, a orientação e a inclinação da superfície em carga e a posição da câmara de ensaio em relação à superfície do terreno sobrejacente têm uma influência fundamental nos valores de «E». Cada superfície carregada pode ser caracterizada por dois parâmetros geométricos. O primeiro é o ângulo $\alpha$ entre o normal à superfície em carga e os planos das principais discontinuidades do maciço rochoso (planos de xistosidade, de sedimentação ou de diaclases, em especial da família mais importante). O segundo é o parámetro C, representando a cobertura efectiva da câmara de ensaio. Este parámetro é função das distâncias verticais e horizontais entre a câmara e a superfície do terreno.

Se for efectuado um número de ensaios suficientes em câmaras de orientação diversa, pode ser traçado um conjunto de curvas do «módulo de elasticidade» em função do parámetro C. Cada curva corresponde a um valor do parámetro $\alpha$. As curvas são obtidas a partir dos resultados dos ensaios e, em cada caso específico, são cada vez mais fáceis de traçar quando comparadas com as obtidas em estudos já realizados para outras formações rochosas (foi só através de tais comparações que se tornou possível traçar as curvas para o local da barragem de Janovas). A fig. 3 mostra as curvas obtidas para diversas formações rochosas ensaiadas em quatro locais de barragem.

Para os casos estudados, o parámetro geométrico C foi determinado por várias fórmulas, tendo em conta a posição da câmara de ensaio por baixo da superfície do terreno. Assim, nos locais de Las Portas e Sfikia foi achada a expressão $\frac{2v + h}{3}$ e para o local de La

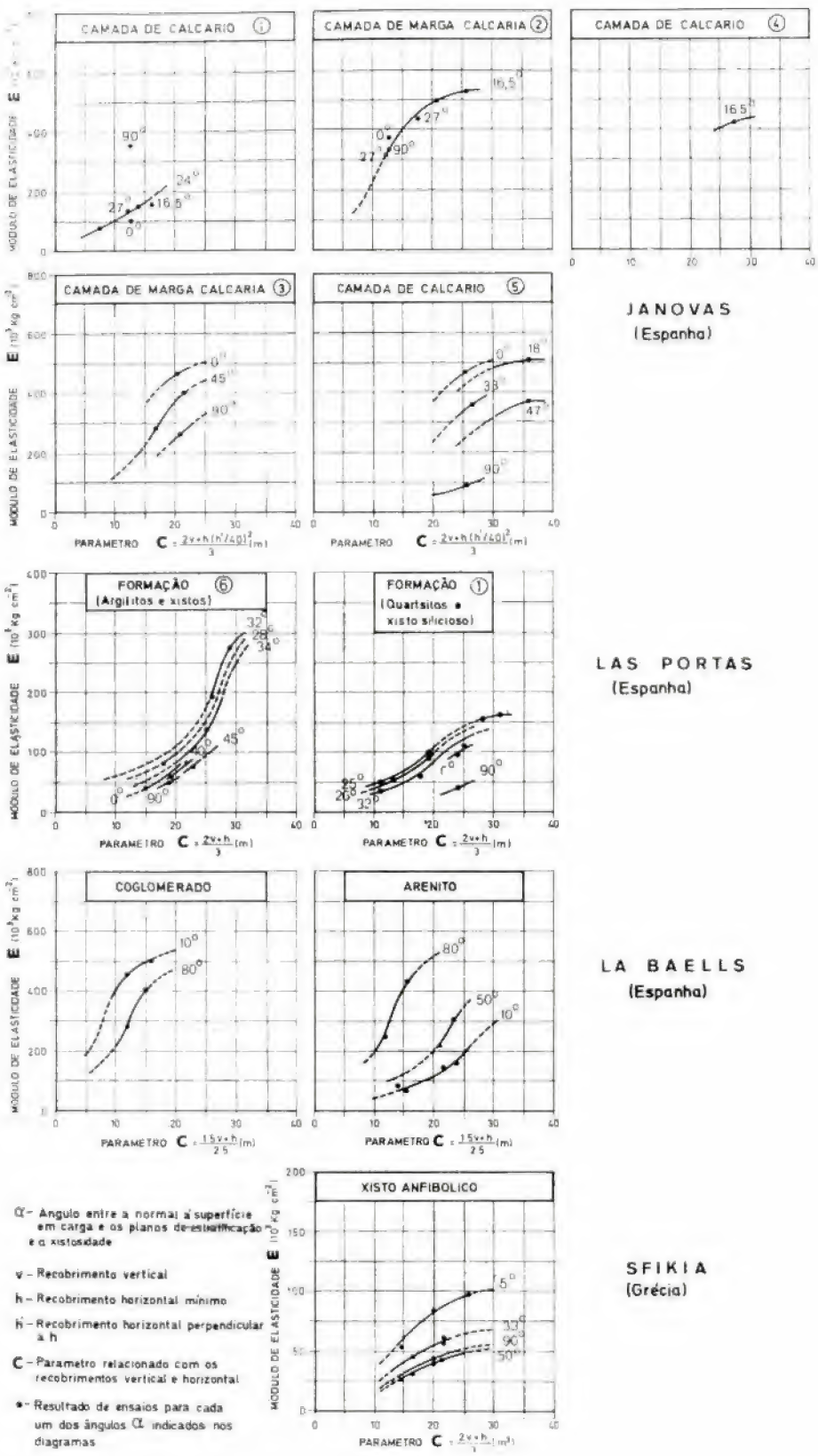



Fig. 3 - Modulos de elasticidade em função dos parametros C e α.

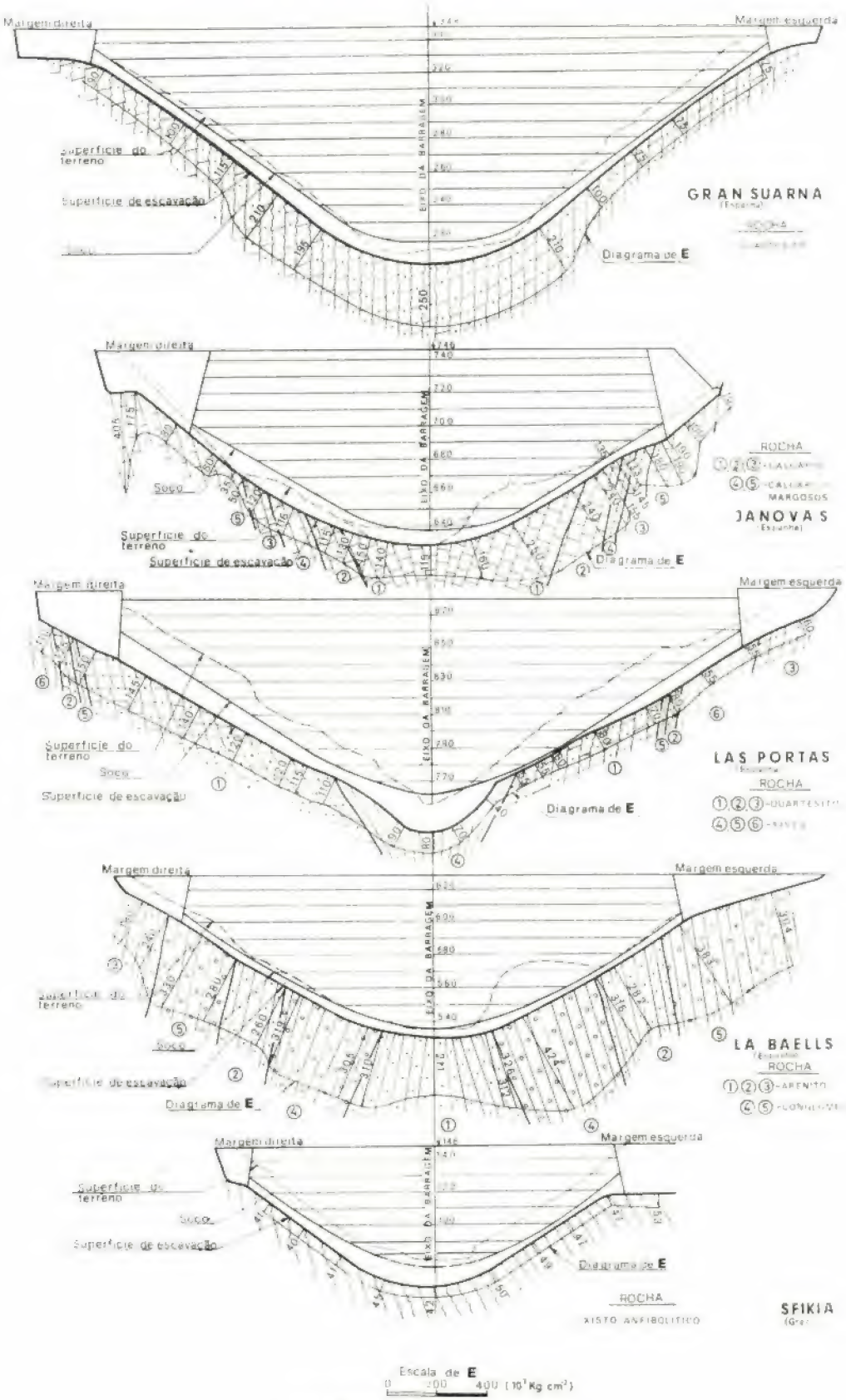



Fig 4-"Modulos de elasticidade" E normais as superficies da fundação de varias barragens.

Baells a expressão $\frac{1{,}5v + h}{2{,}5}$. Em ambos os casos C é apenas uma média pesada entre as distâncias horizontal, h, e vertical, v, até à superfície do terreno, sendo a última considerada como um peso de 2 nos casos de Sfikia e Las Portas e de 1,5 no caso de La Baells. Nos vales muito regulares, apenas com ligeira variação de secção, há uma certa relação entre os valores dos pesos que devem ser considerados para v e o gradiente da compressão natural em profundidade: quanto menor o último maior o primeiro. Nesse aspecto, Janovas é um caso algo especial. A cobertura h é de facto considerada como tendo um peso que é uma função de h' (cobertura horizontal perpendicular a h), com um limite superior de 1. Quer isso dizer que o peso de h foi sempre, neste caso, menor que ou igual a 1. Este peso tenta considerar a influência da discontinuidade frontal do horizonte calcário 1 sobre a anisotropia dos diversos horizontes. As curvas relativas a Janovas, que se vêm na fig. 3, indicam muito claramente essa influência. De facto, enquanto os horizontes 3 e 5, longe de 1, mostram uma maior deformabilidade quando a carga é paralela à estratificação, o horizonte 2 tem comportamento quase isotrópico. É evidente, também, uma transição progressiva da anisotropia do horizonte 1 para a dos horizontes 3 e 5.

Os conjuntos de curvas do tipo das que aparecem na fig. 3 são de bastante interesse prático, uma vez que permitem traçar os diagramas de «E», «E'», etc., ao longo da fundação, para várias direcções ou apenas na direcção da normal à superfície de fundação projectada, «$E_n$». Para este efeito, basta escolher um número apropriado de pontos para essa superfície e calcular para cada um:

1 — o valor $\alpha$ que corresponde à normal à superfície da fundação num dado ponto;

2 — os valores de v e h, desprezando a presença de qualquer recobrimento anómalo local, ou afloramento;

3 — o valor do parámetro C e;

4 — o valor de «E» que corresponde aos valores de C e $\alpha$ obtidos das curvas da fig. 3.

A fig. 4 mostra as curvas dos módulos de elasticidade «$E_n$» ao longo da superfície de fundação de diversos locais de barragens em Espanha e na Grécia.

## 4 — IMPORTÂNCIA DA INJECÇÃO NA DEFORMABILIDADE

Considera-se geralmente que a injecção de caldas de cimento melhora as propriedades dos maciços rochosos (*), mas poucos resultados têm sido apresentados. A fig. 5 mostra uma comparação entre a anisotropia da deformabilidade antes e depois do tratamento por injecção, efectuado no local da barragem de Sfikia, em anfibolitos xistosos. Este resultado pode talvez ser considerado típico de maciços rochosos em camadas. De facto, na barragem de Cambambe (Angola), foram obtidos resultados idênticos, não publicados, em arenitos em em camadas. De uma análise dos resultados apresentados na fig. 5, pode-se deduzir o seguinte:

— Os valores de «E» relativos à superfície normal à xistosidade são substancialmente mais altos do que os obtidos para superfícies paralelas à xistosidade (carga perpendicular aos planos de xistosidade).

— O valor mínimo de «E» antes da injecção corresponde a um valor de $\alpha$ da ordem dos 50°. Este valor do ângulo $\alpha$ representa a situação para a qual o contributo do deslizamento ao longo dos planos de xistosidade (ou microfissuras) é máximo. Deve-se frisar que, apenas quando $\pi/2 - \alpha$ é maior que $\beta$ (sendo $\beta$ o ângulo de atrito interno nos planos de xistosidade), haverá deslocamento por deslizamento. Isto indica que o ângulo $\beta$, sob condições normais de humidade, será da ordem dos 40°. De facto, em ensaios de corte no local, foi obtido um valor de 32° com o maciço rochoso totalmente saturado.

— O tratamento de injecção contribui efectivamente para melhorar o «módulo de elasticidade» do maciço rochoso. Essa melhoria é reflectida nos ensaios no local de Sfikia através de um aumento do «E» de cerca de 15 a 25 % para superfícies paralelas à xistosidade ($\alpha = 90°$); cerca de 100 % para superfícies normais à xistosidade $\alpha = 0°$) e 110 e 115 % para superfícies correspondentes a $\alpha = 33°$ e $\alpha = 55°$, respectivamente.

— O tratamento do local por injecção acentuou a anisotropia.

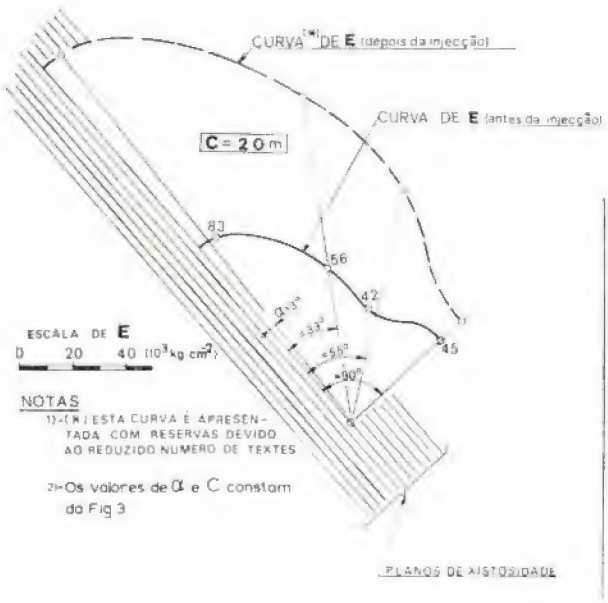



Fig. 5 - Anisotropia da deformabilidade antes e depois do tratamento por injecção

## 5 — DEFORMAÇÕES IRRECUPERÁVEIS DOS MACIÇOS ROCHOSOS

Conforme mencionado anteriormente, durante os ciclos de carga e descarga dos ensaios de deformabilidade observa-se sempre uma certa deformação irrecuperável. Este facto tem sido atribuido ao fecho das diaclases e microfissuras que se mantêm parcialmente fechadas durante a descarga. Tem sido indicado ([5]) que esta deformação ou deslocamento permanente (assentamento) é reduzido pela injecção e, por outro lado, sabe-se que, na prática corrente, a injecção enche apenas as diaclases acima duma certa abertura (0,1 a 0,2 mm).

Os deslocamentos permanentes no fim dos ciclos de carga/descarga dão, normalmente, uma indicação da de compressão dos maciços rochosos. A ideia de estudar a anisotropia dos deslocamentos totais permanentes teve concretização pela primeira vez, no caso do local de Sfikia. Tentou-se uma correlação entre a média dos deslocamentos totais permanentes de cada par de superfícies paralelas em carga e o parámetro C (fig. 6 - I). Essa figura mostra que:

— Os deslocamentos permanentes diminuem com o aumento de C. Os dados indicam que o deslocamento total permanente é reduzido em mais que metade quando C aumenta de 15 para 25 m.

— O deslocamento permanente apresenta um comportamento anisotrópico que é bem definido pelo parámetro $\alpha$.

O diagrama polar da fig. 6 - II foi obtido para um valor C igual a 20 m. Uma comparação com o da fig. 5 mostra que a anisotropia dos deslocamentos permanentes está relacionada com a deformabilidade:

— Os mais altos valores de «E» correspondem aos deslocamentos permanentes mais pequenos e vice-versa.

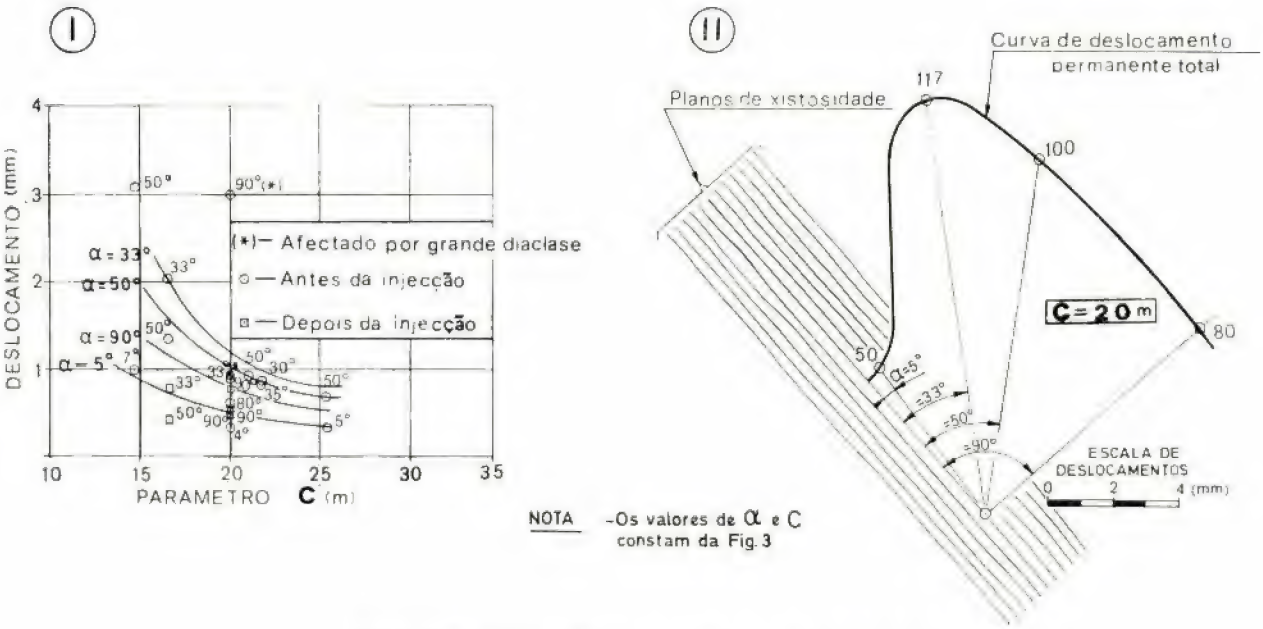
— Os deslocamentos permanentes maiores ocorrem em relação a uma gama de valores $\alpha$ para a qual o potencial de deslizamento ao longo dos planos de xistosidade é máximo.

— A injecção reduz os deslocamentos permanentes.

## 6 — COMPORTAMENTO OBSERVADO EM FUNDAÇÕES DE BARRAGENS

O comportamento real dos maciços rochosos das fundações das barragens, quer durante a construção (devido à sobrecarga com o peso da obra), quer em serviço (devido às cargas transmitidas pela barragem e também às pressões de água intersticial), é actualmente observado com diversos tipos de instrumentos ([12]).

Além das medidas de deslocamentos (usando pendulos invertidos), inclinações (clinómetros) e deslizamentos (medidores de deslizamentos), foi dada especial atenção às medições de deformações (extensões). Essas medições são feitas com extensómetros eléctricos com 2 ou 3 m de comprimento, idênticos aos extensómetros normais para betão ([13]). Os autores já descreveram ([12]), ([14]) essa aparelhagem e as normas de formação de grupos bi-dimensionais, de quatro extensómetros; de grupos




NOTA — Os valores de α e C constam da Fig. 3

Fig. 6 - Resultados obtidos no local da barragem de Sfikia. (I) Correlação entre o deslocamento permanente total e o parametro C. (II) Anisotropia do deslocamento permanente em planos normais à xistosidade.

tridimensionais; de extensómetros compensadores (para efectuar medições das mudanças de comprimento dos maciços rochosos não relacionadas com tensões, mas devidas à temperatura e a mudanças de comprimento «higrométricas», bem como as técnicas apropriadas para colocar esses extensómetros nas fundações.

Algumas das conclusões mais interessantes anteriormente obtidas das medições de extensões em maciços rochosos foram ([12]) ([14]):

— o acordo, em ordem de grandeza, dos «módulos de elasticidade» obtidos pelos ensaios «in situ» e dos calculados a partir das extensões medidas nas fundações rochosas;

— os aumentos do «módulo de elasticidade» vertical com a carga, observados durante a construção de algumas barragens que foram providas de aparelhagem;

— as grandes deformações dos maciços rochosos durante os trabalhos de injecção, conforme observado em várias barragens.

Agora podem ser acrescentados mais alguns resultados e conclusões, tais como:

— dados interessantes sobre a anisotropia da deformabilidade das fundações de algumas barragens;

— em geral, uma grande influência das mudanças de comprimento «higrométricas» do maciço rochoso (devido a variações de humidade nos poros ou à penetração de água na textura da rocha) sobre os seus estados de tensão;

— a existência de um atrazo no tempo entre as situações limite das acções mecânicas (peso máximo ou fim de construção, níveis mínimos ou máximos da albufeira) e o limite correspondente dos valores (máximo ou mínimo) das extensões no maciço rochoso;

— uma redução no «módulo de elasticidade» com a carga para as direcções da tensão de corte máxima nas quais o deslizamento (ou as microfissuras) nos planos de xistosidade contribui claramente para a deformabilidade. Este aspecto parece ser influenciado pela maior ou menor restrição imposta a esse deslizamento pela geometria dos blocos da barragem.

Nos pontos onde os estados de tensão nas fundações são facilmente calculados (por exemplo as bases dos blocos de betão) e onde existem grupos de extensómetros, foram obtidos os valores dos «módulos de elasticidade» em várias direcções, o que permitiu uma visão do carácter anisotrópico da rocha de fundação. Isto foi tornado possível por uma comparação dos estados de tensão calculados e os estados de tensão indicados pelos extensómetros. No caso de barragens abóbada, os pontos da fundação normalmente usados para este efeito foram os pontos do bloco central no plano vertical axial, enquanto que para barragens de gravidade estes pontos foram geralmente os do plano vertical axial dos blocos mais altos. Observou-se que, em diversas instâncias, os valores dos «módulos de elasticidade» obtidos ao longo das diferentes direcções, correspondem perfeitamente à maior ou menor deformabilidade prevista de acordo com as atitudes dos planos de discontinuidade (xistosidade, estratificação, diaclases, microfissuras ou semelhantes). Um bom exemplo é o dos «módulos de elasticidade» obtidos na fundação da barragem de El Atazar (Espanha). Para esse fim, o estado de tensão criado pelo peso do bloco central foi comparado com o estado de tensão correspondente medido por extensómetros. Foi calculado um «estado de tensão», considerando um sólido contínuo, homogéneo e isotrópico, carregado superficialmente ao longo de uma faixa com comprimento indefinido e uma largura constante e igual à largura média do bloco central. A rocha da fundação da barragem de El Atazar é um xisto com planos de xistosidade quase verticais e uma direcção praticamente perpendicular ao eixo do rio. Foram obtidos valores de 60 000 kg. cm $^{-2}$ e de 40 000 kg. cm$^{-2}$ para os «módulos de elasticidade» em direcções paralela e normal à xistosidade, respectivamente.

As mudanças de comprimento «higrométricas» são facilmente detectadas, como se disse, por extensómetros compensadores colocados dentro dos maciços rochosos das fundações. Elas dependem, obviamente, da natureza da rocha. Tais mudanças de comprimento são geralmente pequenas em rochas sãs, aumentando com o grau de alteração. Para rochas ligeiramente alteradas, a expansão «higrométrica» devida à embebição e saturação da rocha (ou, por outras palavras, a uma expansão autogénia devida à presença de água) pode atingir valores de $+ 200.10^{-6}$ a $+ 300.10^{-6}$ ($\mu$/m). Esta expansão do maciço rochoso parece ser benéfica para o comportamento da barragem. De facto, contribui para a redução da permeabilidade do maciço rochoso de fundação, diminuindo a filtração através dele, produz auto-compressão, dando azo a uma redução e mesmo à eliminação de possíveis tensões de tracção no pé (base de montante) não só no maciço rochoso, mas também na parte inferior dos blocos da barragem e cria uma certa compressão no betão perto das fundações, ou seja, no caso das barragens abóbada, no soco da base da abóbada.

O intervalo de tempo, ou atrazo, entre as situações limite das acções mecânicas e as de deformações no maciço rochoso tarda, por vezes, algumas semanas. Pensa-se que está relacionado com a natureza plástica e visco-elástica das deformações sofridas pelo maciço rochoso, especialmente as que resultam das discontinuidades (microfissuras, diaclases finas, caixas de falhas, etc.). É evidente que quanto mais denso o programa de leituras durante estes períodos, maior é a precisão com que este atraso pode ser determinado.

A fig. 7 mostra alguns resultados das extensões obtidas por rochas das fundações de três barragens abóbada durante o primeiro enchimento das suas albufeiras. Referem-se ([1]) a uma pequena barragem-abóbada (El Vellon, Espanha), ([2]) a uma barragem abóbada de tamanho médio (Funil, Brasil) e ([3]) a uma outra muito alta e com um coroamento muito comprido (Almendra, Espanha). As rochas da fundação são respectivamente, gneiss micácio, gneiss e granito.

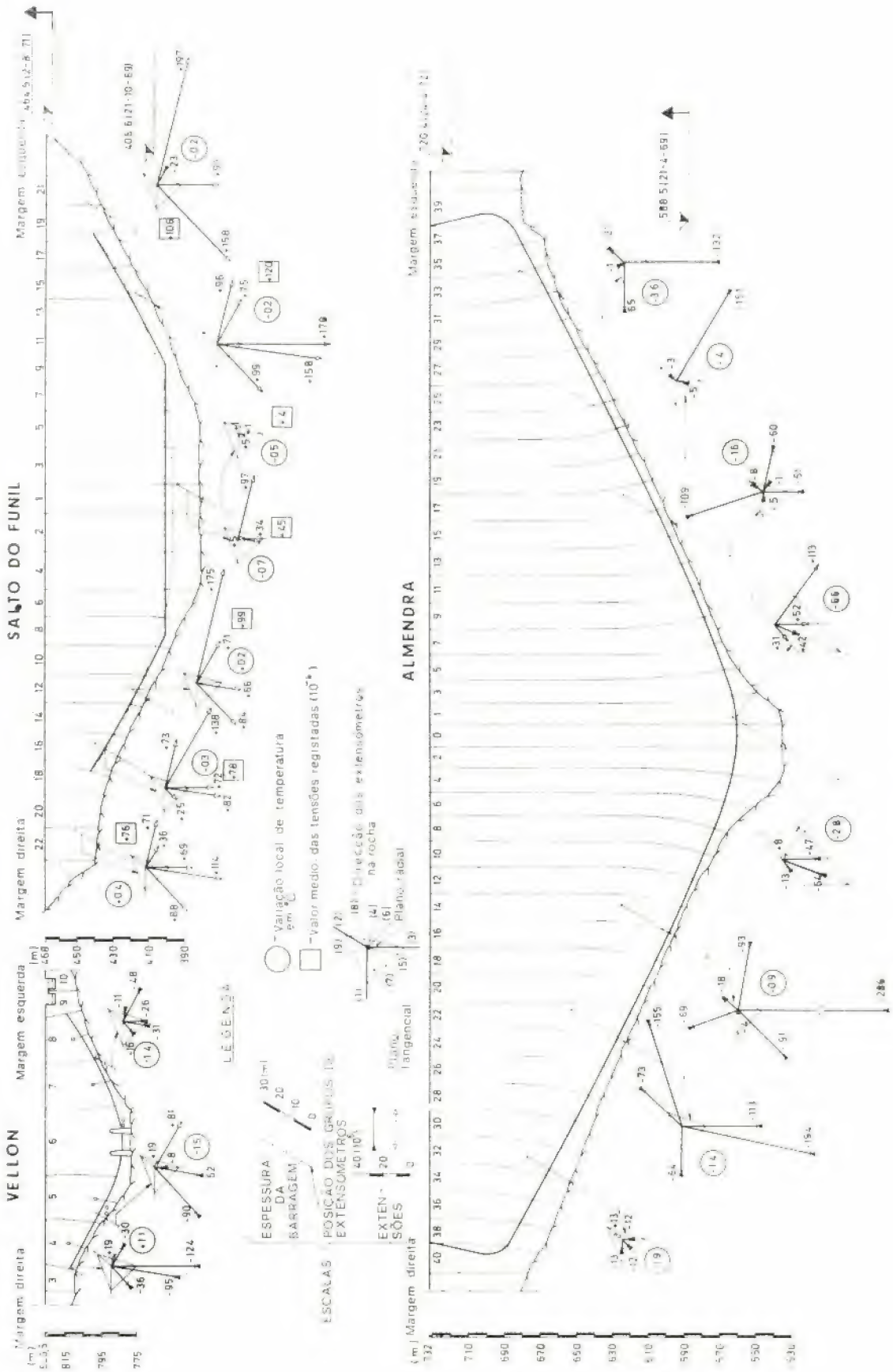



Fig. 7 – Extensões na rocha de fundação de algumas barragens durante o seu primeiro enchimento

Na fig. 6 da referência ([12]), já tinham sido indicados, para o caso da barragem de El Vellón, resultados idênticos, embora referentes a uma fase anterior do enchimento da albufeira. As observações feitas naquele trabalho não são, por isso, repetidas aqui, sendo agora indicadas apenas certas conclusões complementares.

No grupo situado perto da base de montante do primeiro bloco da margem direita, notou-se que a deformação na direcção vertical aumentava consideravelmente em relação à situação indicada na fig. 6 de ([12]). Isto foi devido ao efeito da injecção de cimento na fundação daquela zona da parte inferior da encosta. No caso dos dois grupos simétricos situados a nível médio das encostas perto do pé de jusante da abóbada, notou-se que, em geral, as deformações aumentavam em proporção com o aumento da carga hidrostática. As maiores deformações de compressão continuam a ocorrer ao longo da direcção no plano vertical radial que baixa a 45° para jusante (direcção 5) e das direcções normais às vertentes no plano tangencial (direcção 6 na margem esquerda e direcção 7 na margem direita).

No caso da barragem do Funil, deve-se notar que, como os grupos da fundação desta barragem não têm extensómetros compensadores, não é possível corrigir os valores dessas deformações pela redução das mudanças do comprimento de origem termo-higrométrica. Isto não permite uma avaliação das deformações devidas a tensões (extensões). As mudanças de deformação indicadas na fig. 7 para esta barragem são, de facto, mudanças de comprimento total unitário, isto é, mudanças de comprimento medidas, divididas pelo comprimento do extensómetro (extensões, mais expansões «termo-higrométricas»). A partir do seu estudo cuidadoso, pode-se concluir o seguinte:

1 — Todas as mudanças de comprimento totais unitárias são positivas. Por conseguinte mostram claramente uma expansão da rocha por saturação.

2 — No único grupo existente a jusante (pé do bloco central), as mudanças de comprimento unitárias positivas indicadas na figura devem ser mais baixas do que a expansão efectiva, especialmente para aquelas direcções mais influenciadas pela compressão. Pelo contrário, em relação aos grupos de montante, especialmente para as direcções onde ocorre maior descompressão, essa descompressão deve aumentar as mudanças de comprimento unitárias positivas. De facto, o valor médio das mudanças de comprimento unitárias reais indicadas pelos extensómetros do grupo de jusante é de $+ 4.10^{-6}$, enquanto o valor médio das mudanças de comprimento unitárias dos extensómetros dos grupos a montante varia de um mínimo de $+ 45.10^{-6}$ a um máximo de $+ 120.10^{-6}$.

3 — Nota-se claramente que a expansão «higrométrica» é mais acentuada na fundação da margem esquerda do que na da margem direita. Isto tem uma relação estreita com a mais fácil percolação de água na margem esquerda, causada pelo maior número e maior importância dos acidentes tectónicos que a afectam. Considerando os resultados das medições, parece também que é mais elevada a expansão «higrométrica» a cotas mais altas em ambas as margens.

Para a barragem de Almendra, uma análise dos dados indicados na fig. 7 permite tirar as seguintes conclusões preliminares:

1 — No bloco central, a montante, as extensões positivas indicam a existência de tensões de tracção na fundação devidas à carga máxima da água na barragem. Estas extensões foram o resultado de uma descompressão que tinha ocorrido na rocha ao longo de um período de um ano a partir de 24/4/72 (albufeira à cota 720,4 m). As extensões positivas principais ocorrem numa direcção quase vertical, com inclinação para montante. Dentro deste período de um ano, houve dois sub-períodos, de dois meses cada, durante os quais começaram a maior parte das deformações. Estes sub-períodos coincidem com o princípio de uma subida mais rápida na albufeira. Houve também aumentos repentinos nas pressões de água intersticial na mesma altura na área das fundações dos blocos centrais.

2 — Nos blocos centrais, a jusante, foi precisamente durante os subperíodos indicados que as extensões de compressão se desenvolveram mais rapidamente. O aumento de carga transmitido pela abóbada àquela área da fundação tornou-se assim óbvio. As deformações de compressão são mais altas ao longo das direcções 3 e 5, inclinando para jusante.

3 — Nos grupos tridimensionais situados na parte de jusante da fundação de alguns blocos laterais e para além das direcções 3 (vertical) e 1 (tangencial, horizontal), são também privilegiadas as seguintes direcções em relação às extensões desenvolvidas: na margem esquerda, direcção 6 (aproximadamente normal à superfície da fundação) e direcção 9 (horizontal a jusante); na margem direita 7 e 8, quer dizer, as simétricas das direcções 6 e 9 respectivamente.

4 — Na direcção radial 2, as extensões são, em geral, de menor valor.

REFERENCES


( 1) SERAFIM, J. L. — Rock Mechanics Considerations in the Design of Concrete Dams, *Int. Conference on State of Stress in the Earth's* Crust, Rand Corporation, Santa Monica, California, Junho, 1963.

( 2) GUERREIRO, M., Wilson, R. e Serafim, J. L. — Deformability Tests and some Results from three Spanish Dam Sites, *Int. Symposium on Rock Mechanics*, Tema I, Madrid, Outubro, 1968.

( 3) SERAFIM, J. L. e Guerreiro, M., — «In situ» Tests for the Study of Foundations of Concrete Dams, *Ist. Int. Congress of Rock Mechanics*, Lisboa, 1966.

( 4) SERAFIM, J. L. e Guerreiro M. — «In situ» Defor-

mability Tests of Rock Masses, *10th. Int. Countries Meeting of Int. Bureau for Rock Mechanics*, Tema II Leipzig, Outubro, 1968.

( 5) GUERREIRO, M. — Discussão do Tema 8, *2.° Congress Int. Society of Rock Mechanics*, Vol. IV, Belgrade, Setembro, 1970.

( 6) SERAFIM, J. L., Del Campo, A., Guerreiro, M. e de Ureña, R. — Aspects of the Percolation of Water under Concrete Dams and the Deformation of Rock Foundations, *9th. Int. Congress on Large Dams*, Vol. V, c. 7, Istnbul, Setembro, 1967.

( 7) SERAFIM, J. L. e Ureña, R. — Erste Forschungsergebnisse uber die Verformungsund Brucheigenschaften transversal isotroper Korper, *8th. Meeting of Int. Bureau for Rock Mechanics*, Akademie Ver-*Dams*, Vol. V, c. 7, Istanbul, Setembro, 1967.

( 8) ROCHA, M., Serafim, J. L., Silveira, A. e Neto, J. M. R. — Deformability of Foundation Rocks, Comunicação n.° 75, *V Congress on Large Dams*, Paris, 1955.

( 9) WALSH, J. B. — The Effect of Cracks on the Uniaxial Compression of Rocks, *Journal of Geophysical Research*, vol. 70, n.° 2, 15 de Janeiro, 1965.

(10) JAEGER, J. C. e Cook, N. G. W. — Fundamentals of Rock Mechanics, Ed. Methuen & Co. Ltd., Londres.

(11) SERAFIM, J. L. — Discussion of Theme 2, *2nd. Congress of Int. Society of Rock Mechanics*, vol. IV, Belgrade, Setembro, 1970.

(12) SERAFIM, J. L. e Guerreiro, M. — «In situ» Measurements for Large Dam Foundations, *10th. Int. Countries Meeting of Int. Bureau for Rock Mechanics*, Leipzig, Outubro, 1968.

(13) SIMONDS, A. W. — The Determination of Stresses in an Arch Dam from observed Strains, *Symposium on the Observation of Structures*, LNEC vol II, Lisboa, 1955.

(14) SERAFIM, J. L. — The Behaviour of Arch Dams and their Foundations, *Water Power*, Maio, 1964.

# Feiras, Conferências, Exposições e Congressos

| OBJECTIVOS E PROGRAMAS | LOCAL, DATA, ORGANIZAÇÃO E INFORMAÇÕES |
|---|---|
| Feira Técnica Industrial | Tel-Aviv<br>Outubro - 75 |
| Feira Técnica Internacional | Bucareste<br>Outubro - 75 |
| Salão das Industrias de Equipamento e Manutenção Automóvel | Paris<br>2 a 10 de Outubro - 75 |
| Salon de la Caravane et de la Residence Mobile | Paris - Le Bourget<br>2 a 12 Outubro - 75 |
| Salon de l'Automobile | Paris<br>3 a 13 Outubro - 75 |
| Feira Internacional de Plásticos + Caucho | Düsseldorf 7 - 14 Outubre - 75<br>Rep. Fed. d'Allemagne |

# Feiras, Conferências, Exposições e Congressos

| OBJECTIVOS E PROGRAMA | LOCAL, DATA, ORGANIZAÇÃO E INFORMAÇÕES |
|---|---|
| World Congress ou Finite Element Methods in Structural Mechanics | Bomnemouth, Dorset, England 12 th - 17 th October - 75 at the Royal Bath Hotel |
| Feira Internacional da Construção e Obras Públicas | Madrid<br>10 a 19 de Outubro - 75 |
| FILDA<br>Feira Internacional de Luanda | Luanda<br>5 a 20 de Outubro - 75 |
| Feira Internacional de Bagdade | Bagdade<br>1 a 21 de Outubro - 75 |
| Feira Técnica de Estocolmo | Estocolmo<br>16 a 22 de Outubro - 75 |
| Feira internacional de Guatemala | Guatemala<br>1 a 17 de Novembro - 75 |
| VI ène Colloque International — ITA sur «La Clientèle ou Transport Aérien en 1980 | Paris<br>19 a 21 de Novembro - 75 |
| Feira Técnica Internacional | Lima<br>12 a 23 de Novembro - 75 |
| ELFACK — 75<br>Feira Internacional de Electrónica | Gutemburgo - Suécia<br>26 a 30 de Novembro - 75 |
| Brazil's 1 st Internacional Mechanical Engineering and Electronic Trade Fair | São Paulo<br>20 a 30 de Novembro - 75 |
| Conchete and Aggregates Industries Look Forward to Giant Houston Show in'76 | Houston - Texas<br>1 a 5 de Fevereiro - 76 |
| Internacional Spring Fair | Birmingham<br>1 a 5 de Fevereiro - 76 |
| PRO — IN'76<br>Congresso Internacional e Exposição de Novidades | Düsseldorf<br>21 a 25 de Fevereiro - 76 |
| Exposição Internacional de CON<br>IX Congresso Mundial de Minéria | Düsseldorf 22 al 29 Mayo - 76<br>Minéria 76 |
| 7. Exposição Internacional de Fundição Injectada<br>e<br>Feira das Industrias Suiça | Basle - (Suiça)<br>22 a 26 Junho - 76 |
| 43.° Congresso Internacional de Fundição | Bucareste<br>5 a 10 Setembro - 76 |

# MAGUE

«Pórtico rolante eléctrico de 90t-15t/12,20 m em serviço na Central da Régua, da Companhia Portuguesa de Electricidade».

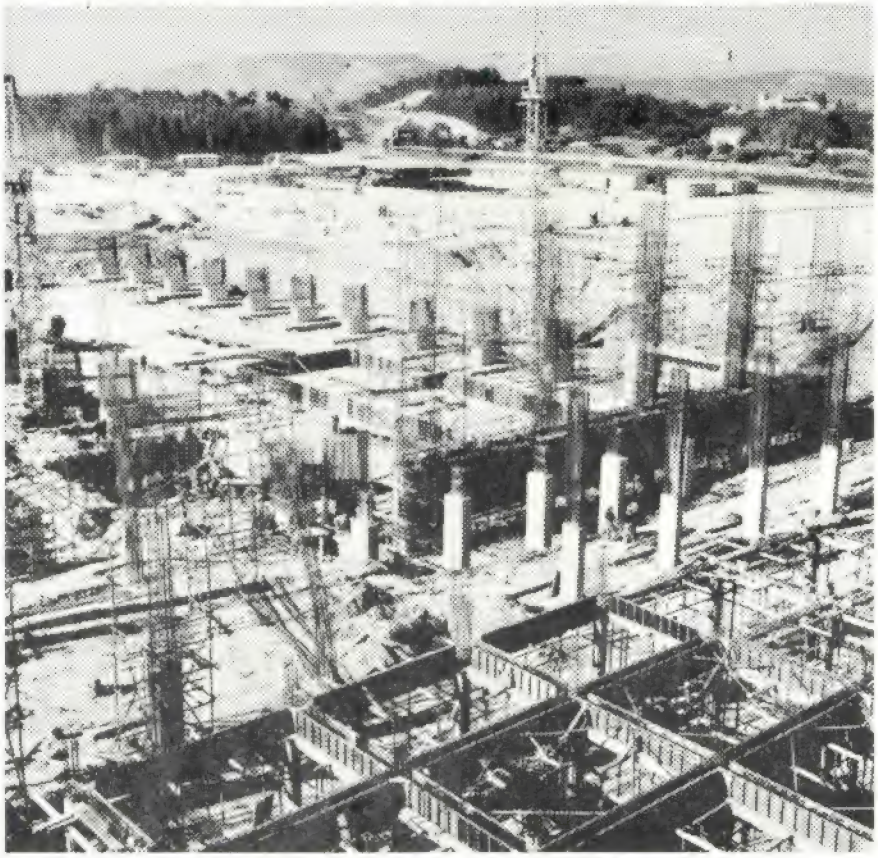
| | |
|---|---|
| PONTES ROLANTES, GUINDASTES E APAR. DE ELEVAÇÃO ESPECIAIS | *Projecto e fabrico* |
| TURBINAS HIDRÁULICAS | *Fabrico segundo licença de A. C. M. de Vevey, S. A.* |
| TURBINAS A VAPOR | *Fabrico segundo licença de Brown Boveri, Cie.* |
| CALDEIRAS A VAPOR | *Projecto e fabrico segundo licença de Foster Wheeler, Co.* |
| EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS | |

CONSTRUÇÕES METALOMECANICAS **MAGUE** S.A.R.L.

ALVERCA DO RIBATEJO — PORTUGAL

# CENTRAL TERMOELÉCTRICA SETÚBAL

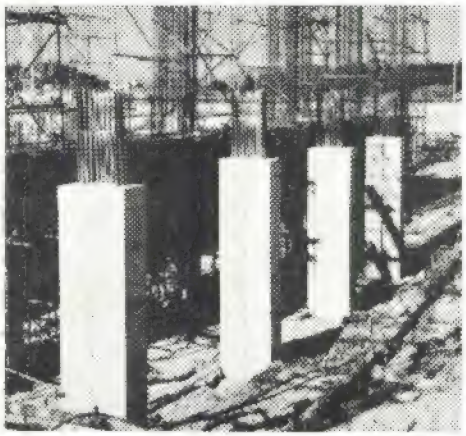
## COMPANHIA PORTUGUESA DE ELECTRICIDADE

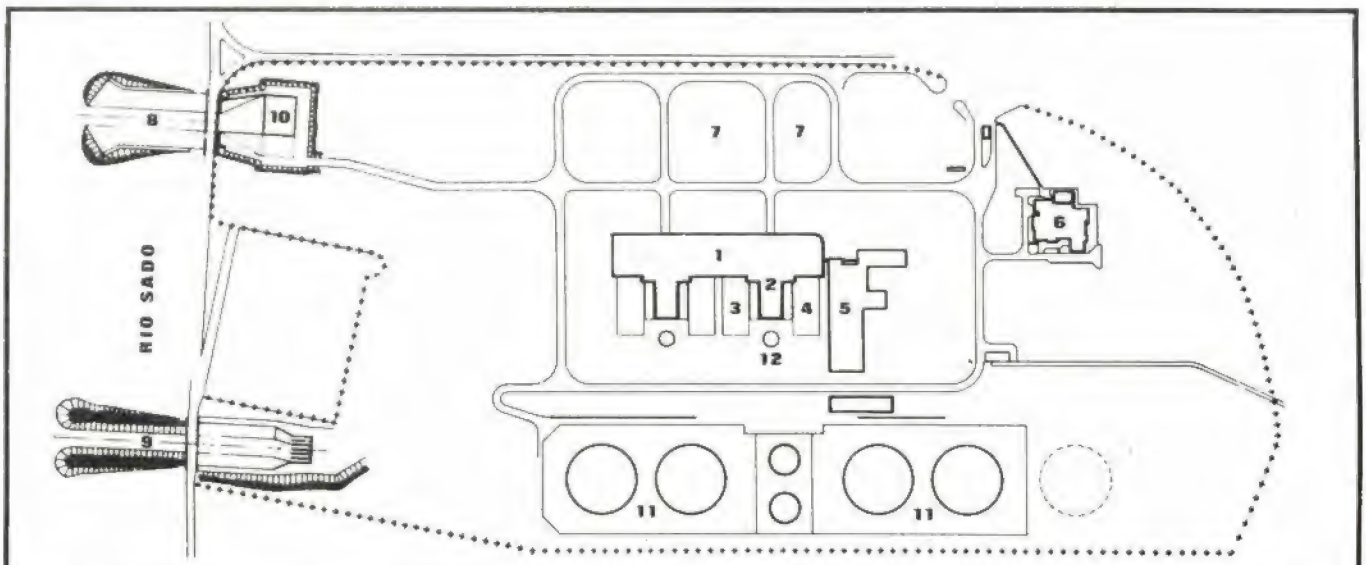


Para um grande empreendimento uma grande empresa. Construções Técnicas dispõe de técnicos e equipamentos capazes de responderem às necessidades do país.

Para uma ideia de grandiosidade deste empreendimento deixamos para aprecição estes números.

| | |
|---|---|
| – Área de construção | 1 000 m x 400 m |
| – Terraplenagem | 350 000 $m^3$ |
| – Varão de aço a aplicar | 2 300 toneladas |
| – Betão a aplicar | 20 000 $m^3$ |






1 – SALA DE MÁQUINAS TURBO GRUPOS
2 – EDIFÍCIOS AUXILIARES ELÉCTRICOS
3 - 4 – GRUPOS GERADORES VAPOR
5 – EDIFÍCIOS ANEXOS
6 – EDIFÍCIOS SOCIAIS
7 – PARQUE TRANSFORMADORES ALTA TENSÃO
8 – TOMADA DE ÁGUA DO CIRCUITO DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO
9 – RESTITUIÇÃO DO CIRCUITO DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO
10 – ESTAÇÃO DE BOMBAGEM
11 – ARMAZÉNS DE COMBUSTÍVEL
12 – CHAMINÉ

uma empresa a responder às necessidades do País

**CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, S.A.R.L.**

AV. 24 JULHO, 24 • TEL. 690172 - 691302 - 690163 • LISBOA - 2

NUMERO 428 JULHO DE 1975 ANO L VOLUME XXXVII

C. D. U. 628.5:551.510.4

# Um modelo gaussiano para a dispersão de poluentes na atmosfera

J. J. DELGADO DOMINGOS
M. TERESA PONTES
Instituto Superior Técnico

RESUMO

*Apresenta-se um modelo Gaussiano de dispersão de poluentes na atmosfera, considerando o efeito de fontes múltiplas pontuais, a existência de inversão de temperatura em altitude, a variabilidade da direcção e velocidade do vento e da estabilidade da atmosfera.*

*A estabilidade da atmosfera é classificada segundo o método de Pasquill sendo o desvio padrão da concentração de poluentes calculado a partir de aproximações numéricas de gráficos de Pasquill-Gifford.*

*No final são apresentados alguns exemplos que ilustram o efeito da variação da estabilidade da atmosfera, da existência de inversão e a interferência de fontes próximas.*

ABSTRACT

*This report presents a Gaussian dispersion model for gaseous pollutants which accounts for the effects of multiple ponctual sources, temperature inversion, atmospheric stability and variations in both wind speed and direction.*

*The stability of the atmosphere is classified into Pasquill's classes and the standard deviations of the concentration ( $\sigma_y$ , $\sigma_z$ )are calculated by means of a numerical approximation to Pasquill-Gifford's plots.*

*A few examples ilustrating the effect of atmospheric stability and of inversion on ground level concentration and of the interference of nearby sources are also worked out.*

## 0. INTRODUÇÃO

0.1. Ao considerar aspectos estritamente técnicos da poluição do ar ou da água, duas vias complementares imediatamente se nos oferecem: a da geração dos poluentes e a da sua dispersão.

Nesta comunicação restringir-nos-emos a uma faceta muito particular da dispersão de poluentes na atmosfera que, por consistir num método de cálculo expedito, se presume possa corresponder aos interesses práticos dos participantes neste congresso.

Métodos deste tipo, embora mais simplificados, são hoje dos mais correntes e neles se baseiam praticamente todos os códigos de dimensionamento de chaminés actualmente existentes. Tais códigos consideram em geral uma fonte única e uma direcção de vento constante. O modelo aqui adoptado considera o efeito de fontes múltiplas, a variabilidade da direcção do vento, as classes de estabilidade da atmosfera e o efeito da altura de inversão.

Relativamente à validade da sua aplicação e à justificação do seu uso remete-se para [1] onde se discutem as bases de códigos actualmente existentes.

## 1. MODELOS GAUSSIANOS

1.0. De modo a situar os modelos Gaussianos na sua perspectiva, resumem-se seguidamente as considerações fundamentais que levaram à sua formulação. Basicamente, tais considerações são: complexidade excessiva das equações fundamentais que regem os fenómenos de difusão; ausência de conhecimento suficiente quanto à difusão turbulenta; imprecisão quanto a dados meteorológicos e caracte-

rísticas das fontes de emissão; custo excessivo das simulações com modelos mais complexos para sua utilização sistemática.

Todos os aspectos referidos têm sido e são objecto de trabalho no grupo de investigação onde nos integramos. A complexidade das equações não constitui limitação essencial face às técnicas numéricas entretanto desenvolvidas, apenas o constituindo os computadores de que podemos dispor. A investigação sobre a difusão turbulenta, embora não tenha ainda permitido um completo esclarecimento do assunto, permite, no entanto, em conjugação com as técnicas numéricas desenvolvidas, a solução adequada duma classe cada vez maior de problemas. As limitações quanto a dados meteorológicos, sobretudo de natureza local irão sempre existir; todavia, a conjugação dos conhecimentos relativos à turbulência com as técnicas numéricas permitiram já um avanço considerável na previsão de microclimas e da sua interacção com as alterações locais motivadas pelo relevo, a florestação, os poluentes introduzidos, etc. Permanecem, pois, como muito importantes, as limitações relativas ao custo das simulações em computador, as que se referem à inventariação das fontes e a informação meteorológica relativa às médias e grandes escalas.

Todos os aspectos referidos são hoje objecto de investigação em centros importantes. Entre nós, a eles se ligam as publicações [2] a [9].

1.1. Com os modelos Gaussianos procura-se obter a universalidade e segurança que conferem as equações fundamentais, evitando simultaneamente a complexidade e custo que resultaria da sua solução tendo em conta todos os factores. Com essa finalidade, as equações fundamentais são simplificadas admitindo:

— regime estacionário

— coeficientes de difusão constantes

— vento uniforme e de direcção constante

— ausência de reacção química entre poluentes

— difusão desprezável na direcção do vento

Com estas hipóteses, a equação fundamental é linear e torna-se possível obter soluções analíticas simples. Dadas as simplificações introduzidas, tais soluções só muito grosseiramente descrevem o fenómeno. Para que os resultados se aproximem da realidade, a via seguida é a de ajustar empiricamente a solução analítica aos resultados experimentais através da dependência dos coeficientes de difusão das coordenadas espaciais. De acentuar que tal dependência é introduzida na solução e não na equação de partida. As razões deste modo de proceder são essencialmente de natureza prática, resultando a sua utilidade da validação experimental que foi possível conferir-lhe.

É sobretudo de realçar que, embora de forma aproximada, é possível ter em conta nesta formulação a influência da estabilidade da atmosfera, a qual se traduz na forma da dependência espacial dos coeficientes de difusão. Tal dependência foi inicialmente introduzida por Pasquill e posteriormente modificada por Gifford. A simplicidade do tratamento e a extensa validação experimental a que foi submetida sobretudo nos E. U. A. e no Reino Unido estão na origem da extensa utilização que delas hoje se faz

1.2. Apesar da validação experimental e da sua generalidade, os modelos Gaussianos apresentam intrínsecas limitações, que são frequentemente esquecidas. A utilização duma simulação numérica mais elaborada, tal como a própria verificação experimental revelam facilmente que o relevo, o perfil do vento, as características do terreno (e da vegetação) etc. introduzem desvios que o modelo não pode explicar.

Tal não impede, porém, a sua utilidade em estimativas preliminares pelo que se justifica não só o seu uso generalizado como a sua extensão a situações não previamente consideradas.

## 2 MODELO ADOPTADO

2.1. Tendo em conta as limitações mas reconhecendo as vantagens da formulação de tipo Gaussiano, o caso de fontes múltiplas e da variabilidade da direcção do vento foi considerado. Além disso, é feita a sua extensão ao caso em que existe uma inversão de temperatura.

Tendo em conta as hipóteses típicas do modelo Gaussiano, pode obter-se para uma distribuição contínua de fontes pontuais a seguinte solução analítica da equação fundamental para o caso em que no solo não existe absorção de poluente:

$$C(x, y, z) = \frac{1}{\pi \overline{U}} \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{\sigma_{y(x-x_i)}\ \sigma_{z(x-x_i)}} \cdot \left\{ \exp - \frac{(z-h_i)^2}{2\sigma_z^2} + \exp - \frac{(z+h_i)^2}{2\sigma_z^2} \right\} * \exp\left[ - \frac{(y-y_i)^2}{2\sigma_z^2} \right]$$

em que ox coincide com a direcção média do vento; oz com a direcção vertical e oy com a direcção transversal, sendo:

$\overline{U}$ — velocidade média do vento

$Q_i$ — potência da fonte i (mg/s) localizada no ponto $x_i$, $y_i$, $h_i$

$x_i$, $y_i$ — coordenadas da fonte i no plano oxy

$\sigma_y$, $\sigma_z$ — desvio standard da distribuição do poluente na direcção horizontal e vertical respectivamente

$h_i$ — altura efectiva da fonte i

A coordenada $h_i$ coincide com a altura da fonte no caso de não haver elevação sensível do poluente devido à sua velocidade de emissão ou à

sua temperatura. No caso geral de uma chaminé existe uma elevação $\Delta h$, pelo que, nesse caso, $h_i = h_{si} + \Delta h_i$ sendo $h_{si}$ a altura geométrica de emissão. A introdução de $h_i$ e o seu valor é uma aproximação que se discute em [1].

2.2. No caso de existir uma inversão de temperatura à altura $H > h_{si}$, o seu efeito pode ser aproximado por um impedimento à passagem dos poluentes para além de H. A solução analítica para este caso obtém-se pela técnica das imagens, considerando reflexões sucessivas no plano do solo e no plano à altura H. Embora teoricamente se deva considerar um número infinito de fontes virtuais, verifica-se que a precisão é suficiente considerando apenas três pelo que a solução final é, para a concentração ao nível do solo:

$$C(x, y, O) = \frac{1}{\pi u} \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{\sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(y - y_i)^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{h_i^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(2H - h_i)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(2H - h_i)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

2.3. As soluções analíticas anteriores são válidas para o caso dos coeficientes de difusão serem uniformes como já referido; o que caracteriza os modelos Gaussianos é a introdução duma dependência funcional entre os desvios standard (ou «mutatis mutandis» dos coeficientes de difusão) e as coordenadas espaciais. Tal dependência, introduzida empiricamente por Pasquill e modificada por Gifford tem em conta a turbulência atmosférica a qual é indirectamente introduzida através das classes de estabilidade atmosférica. Tal dependência é expressa por aqueles autores sob forma gráfica das quais obtivemos uma aproximação analítica através de um ajustamento por mínimos quadrados de expressões do tipo:

$$\log \sigma = \sum_{j=1}^{n} a_j \, x^{j-1}$$

As mesmas classes de estabilidade estão ligadas com o desvio standard da direcção do vento para tempos de amostragem curtos (de 10 a 60 minutos) e a seguinte relação empírica foi estabelecida por Gifford [ 23 ]:

QUADRO II

| $\sigma_\theta$ (Graus) | Classe de Estabilidade de Pasquill |
|---|---|
| 25 | A |
| 20 | B |
| 15 | C |
| 10 | D |
| 5 | E |
| 2,5 | F |

Nos quadros seguintes apresentam-se as classes de estabilidade em função de parâmetros meteorológicos e para cada classe os coeficientes $a_j$ correspondente a $\sigma_y$ e $\sigma_z$.

QUADRO III

$\log \sigma_y = a_0 + a_1 \log x + a_2 (\log x)^2$

| Classe de estabili. | $a_0$ | $a_1$ | $a_2$ |
|---|---|---|---|
| A | - .88685 | 1.21747 | - .04867 |
| B | - .94252 | 1.15522 | - .03732 |
| C | - .93453 | 1.06553 | - .02435 |
| D | - 1.15973 | 1.09563 | - .02942 |
| E | - 1.30518 | 1.11223 | - .03278 |
| F | - 1.55707 | 1.15887 | - .03873 |

QUADRO I

| Velocidade do vento m/s | Insolação durante o dia | | | Condições nocturnas cobertura de nuvens | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Forte | Moderada | Ligeira | | |
| < 2 | A | A – B | B | ≥ 4/8 | ≤ 3/8 |
| 2 | A – B | B | C | E | F |
| 4 | B | B – C | C | D | E |
| 6 | C | C – D | D | D | D |
| > 6 | C | D | D | D | D |

QUADRO IV

$$\log \sigma_z = a_0 + a_1 \log x + a_2 (\log x)^2 + a_3 (\log x)^3$$

| Classe de estabilid. | $a_0$ | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ |
|---|---|---|---|---|
| A | - 3.59404 | 5.52815 | - 2.43013 | .43121 |
| B | - 2.88414 | 3.66915 | - 1.22382 | .18518 |
| C | - 1.47282 | 1.31929 | - .07458 | .00034 |
| D | - 1.97892 | 1.74620 | - .23946 | .01499 |
| E | - 1.88705 | 1.47860 | - .13449 | .00076 |
| F | - 2.06895 | 1.51700 | - .15818 | .00306 |

2.4. As expressões anteriores são aplicáveis quando o vento mantém uma direcção uniforme. Se a variação de direcção é lenta, os efeitos cumulativos resultantes são pequenos e as expressões são utilizáveis a cada instante desde que se introduza um sistema de coordenadas em que ox coincida sempre com a direcção do vento. Em relação a este sistema de coordenadas, a posição das fontes vai naturalmente variar. Esta transformação é feita automaticamente na implementação do modelo em computador.

## 3.0. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO EM COMPUTADOR

3.1. O modelo foi implementado num calculador Hewlett-Packard Modelo 30 com 5856 palavras de memória e equipado de um «plotter». A linguagem utilizada é o BASIC.

Para aquele calculador, o número máximo de pontos da malha é 1296 e o de fontes não tem limite, provocando o seu aumento um acréscimo de tempo de calculador. A implementação do modelo noutra linguagem é, aliás, muito fácil.

O programa calcula as concentrações em todos os pontos da malha.

O traçado das isopletas é feito usando uma subrotina concebida para esse fim [21].

3.2. Os dados necessários para utilização do programa são:

*a*) Malha: número de pontos segundo ox e oy e seu intervalo;

*b*) Dados meteorológicos: classe de estabilidade, velocidade e rumo od vento e altura de inversão, em função do tempo;

*c*) Fontes: número de fontes; potência efectiva, velocidade de emissão, temperatura, localização.

3.3. Na Fig. 1 apresentam-se os resultados parciais duma simulação na qual se utilizaram os dados seguintes:

Fonte de altura efectiva 979 m emitindo 350 000 mg$SO_2$/s. Não existe camada de inversão.

Curvas 1 — vento NW; 2 m/s; classe de estabilidade A (muito instável).

Curvas 2 — vento W; 3.5 m/s; classe de estabilidade B (instável).

Traçaram-se as linhas de isoconcentração de $SO_2$ ao nível do solo.

A concentração no solo é superior para a atmosfera mais instável.

Fig. 2 — A mesma fonte com vento de W 3.5 m/s e classe de estabilidade B. Existe uma camada de inversão em altitude cuja base se situa a 600 m. A altura efectiva da fonte neste caso baixa para os 580 m pois não pode ultrapassar a camada de inversão. A concentração no solo é superior quando existe inversão em altitude.

Fig. 3 — Consideram-se duas fontes de características iguais à da Fig. 1; vento W, 3.5 m/s; classe B. Não existe inversão. As fontes interactuam.

## 4.0. CONCLUSÕES

O modelo construido é simples de utilizar e versátil, apresentando em relação aos modelos Gaussianos comumente utilizados algumas extensões do maior interesse, nomeadamente a de ter em conta a altura de inversão.

Este modelo, se pode considerar-se, no momento actual, como um aceitável compromisso entre rigor, flexibilidade e custo, apresenta, como todos os modelos Gaussianos, limitações que importa não esquecer na consideração de situações concretas.

No modelo apresentado apenas se consideram fontes pontuais. A sua extensão a fontes distribuidas segue a mesma metodologia e não oferece dificuldades adicionais. Em todos os casos em que o rigor fornecido por este modelo é insuficiente, há que recorrer aos métodos mais complexos e onerosos a que se fez referência.

## BIBLIOGRAFIA


[1] — Domingos, J. J. D. — Bases para um regulamento de chaminés de instalações de combustão (DTA RC/33 — 1973).

[2] — Domingos, J. J. D. — Curso de extensão universitária sobre a dispersão de poluentes na atmosfera (1972) — Técnica.

[3] — Domingos, J. J. D. — As equações fundamentais em mecânica de fluídos e transmissão de calor (1966) — Revista Portuguesa de Química, Vol. 8.

[4] — Domingos, J. J. D. — Turbulence models tnd their experimental verification (1971) — Técnica.

[5] — Domingos, J. J. D. — The fundamental equations of turbulent incompressible flows (1971) — Técnica.

[6] — Domingos, J. J. D. — Prediction procedures for two-dimensional incompressible flows (1971) — Técnica.

[7] — Domingos, J. J. D. — Recirculating flows (1971) — Técnica.

[8] — Domingos, J. J. D. — Some mathematical aspects of the boundary-layer equations and their application to numerical solutions procedures (1970 — Seminário no Imperial College, Univ. Londres.

[9] — Domingos, J. J. D — Numerical solution of the boundary-layer equations and some underlying mathematical principles (1970) — Seminário na Univ. de Minnesota.

[10] — Domingos, J. J. D. — Mach number effects in turbulent flow (1971) — ADARD Specialist's Meeting in Turbulent Shear Flows, Londres.

[11] — Domingos, J. J. D. — Sistemas de equações às derivadas parciais não lineares. Métodos de solução numérica desenvolvidos no Instituto Superior Técnico (1971) — 1.° Congresso Espano-Luso de Informática.

[12] — Domingos, J. J. D. — Development of a numerical solution procedure for three dimensional turbulent flows (1972) — Euromech Colloquium 33, Berlim.

[13] — Domingos, J. J. D — A perturbed form of the compressible Navier-Stokes equations suitable for numerical computations (1972).

[14] — Domingos, J. J. D. e Roriz, L. F. C. — Dynamics of an evaporationg or burning droplet (1973) — The European Symposium on Combustion.

[15] — Domingos, J. J. D., Santos, J. J. A. dos, e Roriz, L. F C. — Solução numérica de sistemas de equações às derivadas parciais não lineares de tipo parabólico em domínio de geometria arbitrária (1973) — 2.as Jornadas Matemáticas Luso-Espanholas.

[16] — Domingos, J. J. D. — For a qualitative theory of the boundary-layer (1973) — Portugalia Physica.

[17] — Domingos, J. J. D. e Roriz, L. F. C. — The prediction of trajectories of evaporating or burning droplets (1973) — 5th. International Conference of Heat Transfer, Toquio.

[18] — Domingos, J. J. D. e Filipe, J. M. C. — A comparative study of difference schemes for the soluction of

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial F}{\partial x_i}$$

Lecture Notes in Physics (1972) Vol. 18.

[19] — Domingos, J. J. D. e Filipe, J. M. C. — A general computer program for coupled sets of quasilinear parabolic equations in three independent variables (1972) — DTA Report RC/13.

[20] — Santos, J. J. A. dos, e Filipe, J. M. C. — Guia de utilizador para o programa EPA 3012 (1972) — DTA Report RC/14.

[21] — Santos, J. J. A. dos — Um programa para o traçado gráfico de curvas de nível num calculador HP 9820A — 001 (1972) — DTA Report RC/22.

[22] — Domingos, J. J. D. — A crise do ambiente (1972) — Técnica.

[23] — Slade, D. H. — Metereology and atomic energy, USAEC (1968).

[24] — Pasquill, I. — Atmospheric diffusion, Van Nostrand (1962).

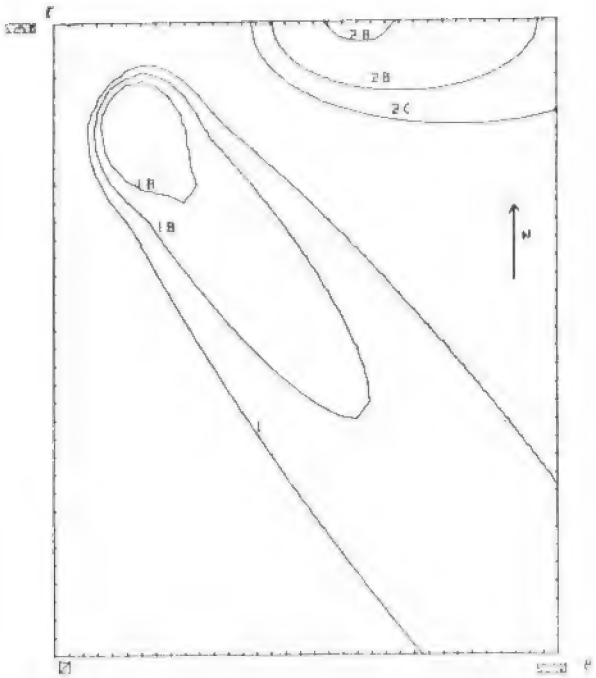



FIG. 1

CLASSE A VENTO W 2M/S
CURVA 1 — .1 MG $SO_2/M^3$
2 — .05
3 — .01
4 — .001

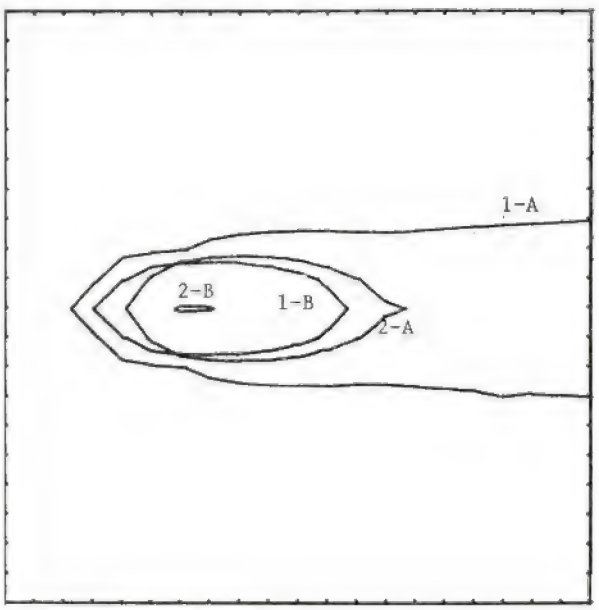



FIG 2

CLASSE B VENTO W 3.5 M/S
CURVAS 1 — INVERSÃO A 600 M
CURVAS 2 — S/ INVERSÃO
A — 04 MG $SO_2/M^3$
B — .01

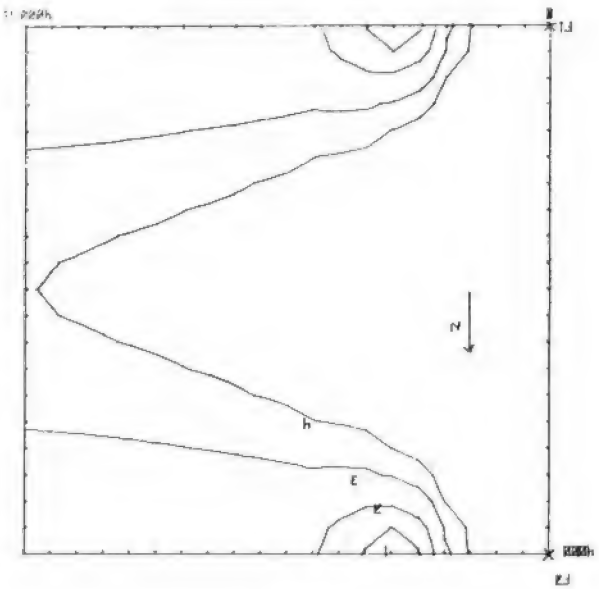



FIG. 3

CURVAS 1 — CLASSE A VENTO NW 2 M/S
CURVAS 2 — CLASSE B VENTO W 3.5 M/S
A — .04 MG $SO_2$ /$M^3$
B — .02
C — 0

# INDUSTRIAIS TEXTEIS

PARA OS VOSSOS MANCHONS, FLANELAS, TRANSPORTADORES,
E TODOS OS TECIDOS TÉCNICOS

EM FIBRAS NATURAIS OU SINTÉTICAS

**Consultem:**

FANAFEL

FÁBRICA NACIONAL DE FELTROS INDUSTRIAIS
SOCIEDADE LIMITADA

APART.: 9
TELEF.: 52091 PBX
TELEG.: FELTROS

OVAR
PORTUGAL

ESCRITÓRIO E FABRICA
ESTRADA DE S. JOÃO

# Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações, L.da

(SONDADORA)

SONDAGENS geológicas e geotécnicas — CAPTAÇÕES de águas subterrâneas — REBAIXAMENTOS do nível freático — CONSOLIDAÇÕES E ESTABILIZAÇÃO do solo — INJECÇÕES DE CIMENTO e outros produtos — INFRAESTRUTURAS de barragens, túneis e pontes — FUNDAÇÕES de todos os tipos

**Única Empresa da especialidade com sede no Ultramar Português**

DELEGAÇÃO - LISBOA
Tr. do Guarda Mór, 13-r/c
Tel. 32 46 93 e 21 32 56

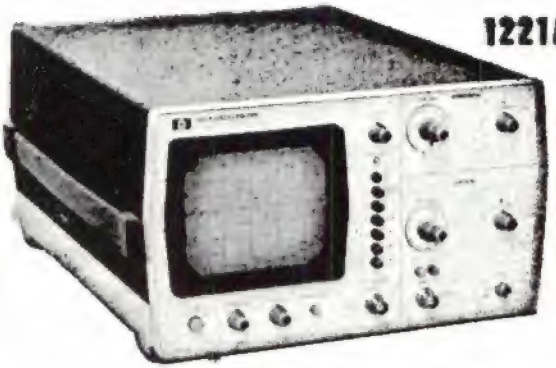
SEDE - LUANDA
R. Francisco Newton, 389/393
C.P. 2178 - Tel. 81 89 7

MOÇAMBIQUE
L. Marques - C.P. 982 - Tel. 74 11 21
Beira - C.P. 1002 - Tel. 7 14 97

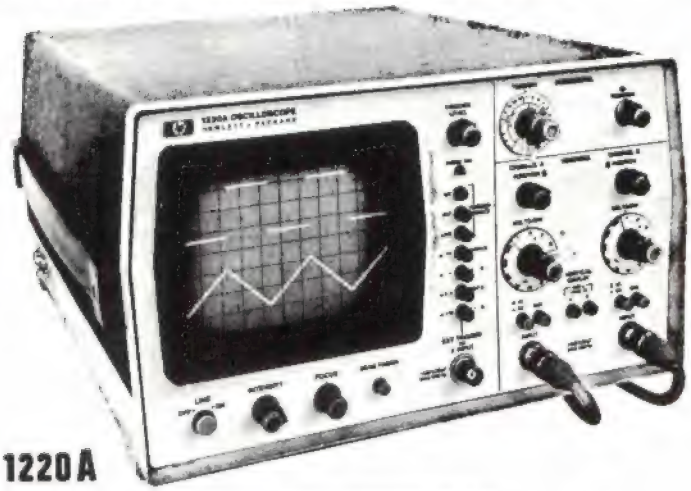
# OSCILOSCÓPIOS

## CONCEBIDOS ESPECIALMENTE PARA O ENSINO TÉCNICO

HEWLETT hp PACKARD



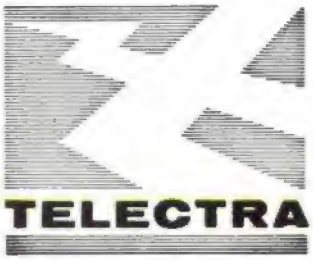
1221A



1220A

| 1220A | 1221A |
|---|---|
| 2 CANAIS | 1 CANAL |
| DC A 15 MHZ | |
| SENSIBILIDADE 2mV/DIVISÃO | |

PEÇA INDICAÇÕES COMPLETAS A




EMPRESA TÉCNICA DE EQUIPAMENTOS ELÉCTRICOS, S.A.R.L.

R. Rodrigo da Fonseca, 103 · LISBOA
Telefones 68 60 72 · 3 · 4 · 5 · Telex 1598
R. José Falcão, 15 · 4º Dto. PORTO · Tel. 2 62 09 · 3 33 50

C. D. U. 621.3:517.512.2

# "Cepstrum" (1)

# Estudo experimental da sua aplicação ao sinal falado. "Vocoders".

IRIARTE JOSÉ ARAÚJO ESTEVES
Engenheiro Electrotécnico (I. S. T.)
Bolseiro do Lab. de Análise de Sinais do I. A. C.
JOSÉ ALBERTO TEIXEIRA
Engenheiro Electrotécnico (I. S. T.)
Assistente do I. S. T.

RESUMO

*Este trabalho, que constitui relatório de um estágio realizado no Laboratório de Análise de Sinais do I. A. C., é iniciado com uma análise resumida do sinal falado e um breve estudo teórico da técnica do cepstrum. Seguidamente é apresentada a aplicação desta técnica na determinação de alguns parâmetros de sinais daquele tipo. Por último, faz-se uma introdução ao estudo dos vocoders.*

SYNOPSIS

*This paper, reprinted from a technical report of Laboratório de Análise de Sinais, I. A. C., starts with a short description of speech signals and a brief theoretical analysis of cepstrum. These techniques are then applied to the determination of speech parameters. The paper ends with an introduction to vocoders.*

## 1 — INTRODUÇÃO

Tendo conhecimento de um trabalho dos colegas Borges de Almeida e Silva Arroz que constitui o seu relatório de estágio, trabalho esse que seguimos com interesse nalgumas das suas fases, sobre as técnicas de «Cepstrum», resolvemos dar continuidade ao estudo deste assunto, tanto mais que a justificá-lo estava o facto de ele ser recente e pouco divulgado.

No trabalho referido, dos colegas Borges de Almeida e Silva Arroz, faz-se um estudo da técnica de «Cepstrum» especialmente na sua aplicação à detecção de ecos e dos seus atrasos relativamente ao sinal «principal» e vários outros problemas com estes relacionados. Baseados nesse trabalho, na bibliografia nele indicada e ainda noutra que nos foi sugerida pelo Dr. Rebelo Simões resolvemos estudar o «Cepstrum» e as suas aplicações no domínio da fala, aquele em que a técnica de «Cepstrum» se mostrou mais frutuosa e onde teríamos algumas possibilidades dado o material que era posto à nossa disposição pelo Laboratório de Análise de Sinais e que noutra parte indicamos resumidamente.

Para tal estudo resolvemos adoptar o seguinte esquema:

No segundo parágrafo começamos por analizar o sinal falado, mostrando alguns exemplos e em seguida, no terceiro parágrafo, põe-se em evidência a necessidade e utilidade do «Cepstrum» no seu estudo.

No quarto parágrafo estuda-se o «Cepstrum» em pormenor e as suas várias formas possíveis são apresentadas e discutidas no quinto parágrafo e faz-se a opção daquele que melhores resultados fornece para o estudo em questão.

Já na análise do sinal falado, por intermédio do «Cepstrum», estuda-se a técnica de «Short-cepstrum», no sexto parágrafo, apresentando-se no sétimo os resultados da aplicação do «Short-cepstrum» a um sinal falado, bem como a análise desses resultados.

No oitavo parágrafo apresenta-se uma aplicação importante do estudo do sinal falado feito nos capítulos

(1) Leia-se «Kepstrum»

anteriores, utilizando o «Cepstrum» — os vocoders» — mostrando-se também diversos tipos possíveis de «vocoders».

No nono parágrafo mostraremos que a técnica de «Cepstrum» deixa de ser útil para sinais falados imersos em ruído com pequenas relações sinal-ruído, sendo então necessário empregar outras técnicas para a determinação do «pitch». A estas técnicas se faz referência no décimo parágrafo.

Chama-se a atenção para o facto de o nosso trabalho ser um estudo experimental, fazendo-se, no entanto sempre que possível, a sua fundamentação teórica.

Por último, queremos também salientar que a técnica de «Cepstrum» cujo estudo se faz é igualmente utilizada noutros domínios, tais como sismologia, radar e sonar e de um modo geral todos os sinais que apresentam ecos (ver o trabalho referido acima, [6]) e ainda no tratamento de sinais biológicos, processamento fotográfico, detecção de sinais imersos em ruído, etc., donde se infere a importância desta técnica.

## 2 — O SINAL FALADO

Vamos descrever neste parágrafo o mecanismo completo de geração dos sons falados, dado que tal se torna necessário para o desenvolvimento do nosso estudo.

Os sons da voz são produzidos pela expulsão do ar dos pulmões (que são, por assim dizer, a nossa fonte de energia vocal) e que é feita de uma forma contínua, de modo que por analogia com as fontes contínuas de energia eléctrica lhe chamamos fonte «DC». Esta energia contínua é transformada em energia pulsante (energia «AC») por um dos três processos seguintes:

a) Por acção das cordas vocais, a qual transforma o fluxo contínuo de ar em pulsações de curta duração e com uma ocorrência quasi-periódica.

b) No interior do tracto vocal criam-se turbulências de ar por variações de contracções desse mesmo tracto vocal.

c) Súbitas libertações de excessos de pressão seguidas de um completo encerramento do tracto em alguns locais ao longo da sua extensão.

O sinal acústico «AC» formado por um destes três modos é chamado «função de excitação» da cavidade vocal e pode tomar três formas diferentes consoante o modo da sua formação. Assim temos respectivamente:

a) Pulsações quasi-periódicas.

b) Ruído contínuo.

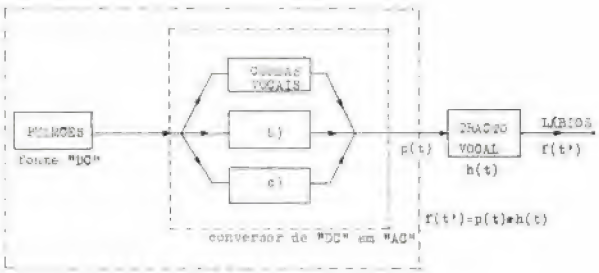
c) Uma pulsação única.

A maior parte dos sons são gerados a partir de uma única destas funções de excitação. Assim, são exemplos de sons formados pela forma a), que na literatura anglo-saxónica aparecem com a designação de sons «voiced» e que poderemos traduzir por sons vocalizados, os sons a, e, i, o e u. Para exemplos de sons gerados pelas formas b) e c), chamados sons «unvoiced» (sons não vocalizados) temos respectivamente s, f, z e p, t.

Alguns sons são gerados a partir de uma mistura de dois destes modos e muito poucos utilizam os três conjuntamente.

Para produzir os diferentes sons falados, para cada modo de excitação, a função de excitação é filtrada pelo tracto vocal, cuja função de transferência (evidentemente no domínio da frequência) depende da posição da língua, dos lábios e outras articulações. No discurso esta função de transferência vai, portanto, variando no tempo, mas é sempre caracterizada por um certo número de ressonâncias, a que se dá o nome de formantes, frequentemente abaixo dos 3000 Hz (valores típicos: 500 Hz, 1500 Hz e 2500 Hz), como veremos adiante mas pode ser já percebido se analisarmos as figuras 4.2 e 4.4.

Esquematicamente, todo o mecanismo descrito atrás pode ser representado como se segue:




FONTE VOCAL

onde se representou por p(t) a função de excitação do tracto vocal e por h(t) a resposta do tracto vocal ao impulso unitário. Os blocos b) e c) representam os processos de formação da função de excitação atrás descritos por b) e c) respectivamente (sons «unvoiced»). O trajecto que no esquema parte dos pulmões e passa pelas cordas vocais é o que produz os sons «voiced».

O sinal falado assume, portanto, a forma

$$f(t') = p(t) * h(t) \quad (^1) \qquad (2.1)$$

ou seja, a convolução de p(t) com h(t).

Para o estudo que se segue a partir de agora e até ao parágrafo 7, inclusivé, interessa-nos principalmente o mecanismo de formação dos sons vocalizados. Para estes sons a função p(t) é, como já vimos, uma sucessão de impulsos de curta duração produzidos pelo fluxo de ar através das cordas vocais as quais permitem a sua passagem a intervalos de tempo mais ou menos regulares dando origem a ondas de pressão cuja representação gráfica está feita na figura 2.1.

(1) Matematicamente, sabemos que t' é uma variável diferente de t, o que resulta da definição de autocorrelação $\gamma(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{J/_2}^{J/_1} f(t).\, f(t+\tau).\, dt$, donde $t' = \tau$. No entanto, por comodidade de exposição, passaremos sempre a usar a variável t, tendo sempre presente este facto.

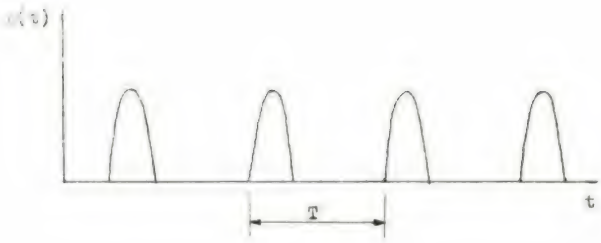



Fig. 2.1

Estes impulsos de pressão originados nas cordas vocais vão excitar os modos de oscilação possíveis no tracto vocal que actua assim como uma cavidade de ressonância.

Note-se que tanto o período T do sinal p(t) produzido nas cordas vocais, como a forma do tracto vocal e portanto a resposta ao impulso unitário h(t) (ou seja os seus modos de ressonância) são variáveis no tempo. Pode pois considerar-se o tracto vocal como um filtro linear, cuja função de transferência é variável no tempo e cuja entrada é uma função «periódica» com um «período» igualemnte variável no tempo. É possível, porém, admitir hipóteses simplificativas, dado que a função de transferência do tracto vocal $H(\omega) = TF[h(t)]$ (transformada de Fourier de h(t)) não varia muito rapidamente com o tempo durante alguns «períodos» de p(t) e dado que o «período» de p(t) varia lentamente com o tempo, de modo que p(t) é uma função quasi-periódica. $H(\omega)$ e T podem, pois, considerar-se constantes em intervalos de tempo contendo vários «períodos» de p(t). Veremos em nota no parágrafo 6 a justificação e validade destas afirmações.

Do que se disse sobre a formação de sons «voiced» se infere que o sinal f(t) é quasi-periódico (de período aproximadamente constante para intervalos de tempo n.T, com n inteiro e pequeno) e resulta da convolução de p(t) com h(t). Na figura 2.2 apresenta-se um exemplo de som «voiced» captado através de um microfone de condensador de alta qualidade, filtrado entre 0 e 2500 Hz e amostrado com uma frequência de amostragem de 5000 Hz, conforme o teorema da amostragem. O conversor analógico-digital utilizado para fazer a amostragem faz parte de um analisador de Fourier HP 5452A, unidade periférica de um computador digital HP 2116C que efectuou o registo. Desse registo foi retirada uma amostra de 128 pontos, ou seja, com uma duração de 25,6 mseg. Para o traçado do troço escolhido do sinal registado, através de um «plotter», o computador executou previamente uma interpolação entre os pontos registados (interpolação linear). Este processo foi utilizado sempre que se traçaram gráficos e deve ser sempre tomado em conta sem o que se poderão fazer deduções erradas.

Se for $P(\omega)$ a transformada de Fourier do sinal p(t) da fonte vocal,

$$P(\omega) = TF[p(t)] \qquad (2.2)$$

e se $H(\omega)$ for a transformada de Fourier da resposta do tracto vocal ao impulso unitário h(t) (função de transferência do tracto vocal)

$$H(\omega) = TF[h(t)] \qquad (2.3)$$

admitindo que ambas as transformadas de Fourier existem, teremos:

$$F(\omega) = P(\omega).H(\omega).2\pi \text{ (2)} \qquad (2.4)$$

sendo

$$F(\omega) = TF[f(t)] \qquad (2.5)$$

Na frequência, o sinal cujo espectro de frequências é $P(\omega)$, é filtrado pelo tracto vocal. De notar que os modos de oscilação do tracto vocal aparecem como picos na função de transferência $H(\omega)$, chamando-se aqueles modos formantes da voz.

De (2.4) temos

$$20 \log F(\omega) = 20 \log P(\omega) + 20 \log H(\omega) \qquad (2.6)$$

Analisando agora a figura 4.2 onde se representa $|F(\omega)|$ em dB, verifica-se que se pode explicitar a estrutura formante (a traço-ponto), que pode ser obtida de uma maneira aproximada, com bastante rigor, traçando a envolvente da curva $|F(\omega)|$ (curva a traço interrompido), facto este que nos vai ser muito útil no parágrafo 8.

## 3 — NECESSIDADE E UTILIDADE DO «CEPSTRUM»

Como veremos mais detalhadamente nos próximos parágrafos, o problema fundamental que se nos põe é o da determinação do «pitch», ou seja, do período T do sinal da fonte p(t). É precisamente de um dos processos de determinação deste «pitch» que nos vamos ocupar.

Para determinar esta frequência fundamental de um sinal periódico, o método que se seguiria «a priori» seria o seguinte:

Se o período do sinal f(t) é T segundos, o seu espectro de potência $|F(\omega)|^2$ é formado por picos espaçados de 1/T Hz, correspondentes à frequência fundamental e todas as suas harmónicas, o que quer dizer que o espectro de potência de um sinal falado quasi-periódico é «periódico» ao longo do eixo das frequências com «período» igual a 1/T Hz, ou seja, o inverso do período de p(t).

O método que então utilizaríamos para determinar a periocidade do espectro de potência, 1/T Hz, seria calcular a transformada inversa de Fourier do espectro de potência. Esta transformada teria um pico correspondente a esse «período».

(2) A partir de agora não voltaremos a apresentar o factor $2\pi$, por não ser relevante.

Este espectro do espectro de potência é conhecido pelo nome de função de autocorrelação do sinal no tempo f(t) — Teorema de Wiener-Khintchine.

Sendo $\gamma_f(\tau)$ a função de autocorrelação de f(t) teremos, por definição

$$\gamma_f(\tau) = \frac{2\pi}{\zeta} TF^{-1}\left[ |F(\omega)|^2 \right] \qquad (3.1)$$

e

$$\gamma_f(\tau) = \lim_{\zeta \to \infty} \int_{-\zeta/2}^{\zeta/2} \frac{1}{\zeta} f(t).f(t+\tau).dt \qquad (3.2)$$

Como o espectro de f(t) é

$$F(\omega) = P(\omega).H(\omega) \qquad (3.3)$$

teremos consequentemente

$$TF^{-1}[\,|F(\omega)|^2\,] = TF^{-1}[\,|P(\omega)|^2\,] * TF^{-1}[\,|H(\omega)|^2\,] \qquad (3.4)$$

onde * representa a função convolução.

Será então:

$$\gamma_f(\tau) = \gamma_p(\tau) * \gamma_h(\tau) \qquad (3.5)$$

com

$$\gamma_p(\tau) = TF^{-1}[\,|P(\omega)|^2\,] \qquad (3.6)$$

$$\gamma_h(\tau) = TF^{-1}[\,|H(\omega)|^2\,] \qquad (3.7)$$

Assim chegámos à conclusão de que a autocorrelação de f(t) é a convolução das autocorrelações de p(t) e de h(t). Portanto os efeitos do som da fonte e do tracto vocal são convolucionados um com o outro na função de autocorrelação.

Deste facto resultam várias dificuldades para a determinação do «pitch», entre os quais temos:

Para certos sinais falados a função de transferência de tracto vocal é tal que a autocorrelação $\gamma_f(\tau)$ tem um grande número de picos. Noutros casos os picos apresentam uma grande largura ou ainda a autocorrelação apresenta um patamar.

Em qualquer destes casos a determinação do «pitch» é difícil, senão mesmo impossível, quer por dificuldade em detectá-lo, quer em defini-lo com precisão.

Consideremos por exemplo o sinal falado da figura 3.1 que é o sinal que se mostrou atrás na figura 2.2. A sua autocorrelação não nos dá uma informação precisa sobre o «pitch», como se vê na figura 3.2, por o pico ser muito largo, apresentando, portanto uma grande imprecisão.

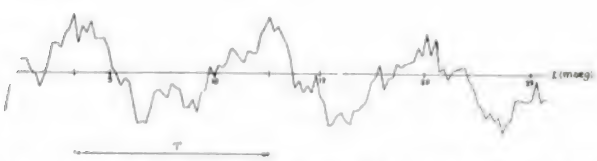


Fig. 3.1 — Sinal falado filtrado entre O e 2,5 kHz (frequência de amostragem: 5 kHz) Número de pontos registados: 128; T = 8,4 mseg

Fig. 3.2 — Autocorrelação do sinal falado representado na fig. 3.1; máximo para t = 8,6 mseg

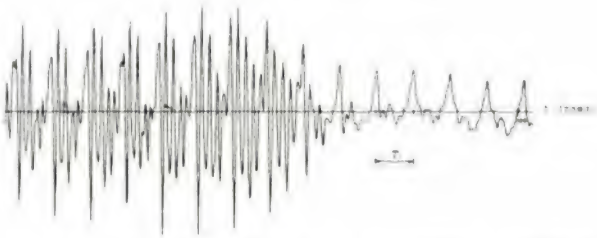


Fig. 3.3 — Sinal falado, filtrado entre O e 2.500 Hz (frequência de amostragem: 5 kHz) Número de pontos registados: 512; T = 7 mseg

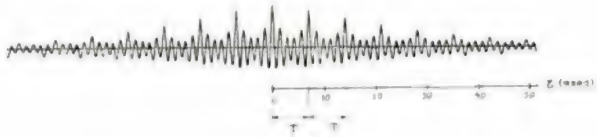


Fig. 3.4 — Autocorrelação do sinal da fig. 3.3

Para o sinal da figura 3.3, cuja frequência fundamental é facilmente calculada por exame directo, a autocorrelação é a apresentada na figura 3.4 e tem, como se vê uma multiplicidade de picos. Neste caso não seria difícil obter informações sobre o período T, se os valores de dois picos consecutivos não fossem, frequentemente, próximos um do outro. Os picos poderão mesmo ter ocorrência não periódica, dificultando a determinação do «pitch». Mas mesmo que a ocorrência seja periódica, tomando em conta que por vezes se dá a duplicação do período T, o que acontece de uma maneira progressiva numa mesma amostra de sinal falado poderemos ter dois «pitch», um com o valor duplo do outro, situação esta que importa igualmente detectar. Com a autocorrelação apresentando picos múltiplos periódicos não sabemos nunca se estamos na situação descrita ou não, tornando a análise complicada.

Sabemos, por outro lado, que para sinais de banda estreita a autocorrelação não fornece resultados satisfatórios [6]. Para estes sinais a utilização do «tapering» seguida do «cepstrum», como se explica no parágrafo 6, resolve o problema por razões que então veremos. No entanto não conseguimos descobrir nenhum sinal falado que fosse de banda estreita (embora o pudéssemos obter artificialmente por filtragem, achámos incorrecto fazê-lo, porque corresponderia a uma situação em que se perderia a inteligibilidade da fala), pelo que não apresentamos qualquer exemplo deste último caso.

Problemas de vária ordem, como por exemplo, pequenas relações sinal-ruído, distorções não lineares, mudançasde fase, etc., tornam o problema da determinação do «pitch» de um sinal cujas características estatísticas não são conhecidas «a priori» num problema complicado [2]. Nos parágrafos 9 e 10 faremos uma referência resumida a estes casos.

Do que ficou dito (excepto no parágrafo atrás que exige outros métodos) se infere da necessidade e utilidade do «cepstrum», o qual vamos passar a estudar em pormenor no próximo parágrafo.

## 4 — «CEPSTRUM»

Vimos, portanto, que a determinação do «pitch» através da autocorrelação não é em geral satisfatória.

Considere-se, então, que antes da determinação da periodicidade 1/T Hz do espectro de potência de f(t), $|F(\omega)|^2$ se emprega a função logaritmo.

$$|F(\omega)|^2 = |P(\omega)|^2 . |H(\omega)|^2 \qquad (4.1)$$

$$\log |F(\omega)|^2 = \log |P(\omega)|^2 + \log |H(\omega)|^2 \qquad (4.2)$$

Vemos que deste modo os efeitos do tracto vocal e da fonte vocal se adicionam (a transformada inversa de Fourier de uma soma é igual à soma das transformadas inversas de Fourier das parcelas) em vez de se convolucionarem, como acontecia não empregando a operação intermédia de logaritmo.

Note-se que não teremos de trabalhar necessariamente com espectros de potência. Se utilizarmos os espectros de frequência teremos

$$|F(\omega)| = |P(\omega)| . |H(\omega)| \qquad (4.3)$$

$$\log |F(\omega)| = \log |P(\omega)| + \log |H(\omega)| \qquad (4.4)$$

e o tratamento posterior é análogo ao que vamos desenvolver usando espectros de potência, pois

$$\log |P(\omega)|^2 = 2.\log |P(\omega)| \qquad (4.5)$$

e portanto há apenas uma mudança de escala na passagem de um processo para outro. Como veremos no parágrafo seguinte, é com este último processo que trabalharemos, pois, para os meios de cálculo que utilizámos conduz-nos a erros menores.

A importância de os efeitos do tracto vocal e da fonte vocal serem aditivos pode ser facilmente visionado nos exemplos seguintes.

Na figura 4.1 está representado o módulo do espectro de frequências do sinal da figura 3.3 e na figura 4.2 o seu logaritmo (ver final do parágrafo 2 para a interpretar). Nas figuras 4.3 e 4.4 temos respectivamente o espectro de potência do sinal da figura 3.3 e o seu logaritmo. Tanto no logaritmo do módulo de $F(\omega)$ como no logaritmo de $|F(\omega)|^2$ o efeito do tracto vocal é produzir uma oscilação de baixa «quefrência» (anagrama da palavra frequência, sugerido pela troca de domínios: quefrência = frequência de uma função com domínio na frequência [5]), enquanto que a periodicidade da fonte vocal vai dar origem a uma «periodicidade» de 1/T Hz, ou seja, uma oscilação de alta frequência.

Para determinar esta periodicidade 1/T Hz podemos utilizar um dos métodos próprios e bem conhecidos para o fazer, como sejam o espectro de frequências ou o espectro de potência.

Mais rigorosamente vamos determinar o espectro de quefrências (ou o quadrado do seu módulo) da função

$$\log |F(\omega)|^2 = \log |P(\omega)|^2 + \log |H(\omega)|^2 \qquad (4.6)$$

ou da função

$$\log |F(\omega)| = \log |P(\omega)| + \log |H(\omega)| . \qquad (4.7)$$

O espectro de quafrências, ou seja, a transformada inversa de Fourier de qualquer das funções (4.6) ou (4.7) apresenta um pico agudo correspondente à alta quefrência, o «pitch», e picos diversos para valores baixos da quefrência que correspondem à estrutura formante. É o que se vê na figura 4.5, onde está representada a transformada inversa de Fourier do logaritmo do módulo do espectro de frequências do sinal da figura 3.3 e na figura 4.6 onde se representou a transformada inversa de Fourier do logaritmo do espectro de potência do mesmo sinal.

Note-se que sendo

$$\log |F(\omega)|^2 = 2.\log |F(\omega)|$$

é

$$TF^{-1} \{ \log |F(\omega)|^2 \} = 2.TF^{-1} \{ \log |F(\omega)| \} \qquad (4.8)$$

donde as funções são as mesmas, aparte o factor multiplicativo 2.

Fig. 4.1 — Espectro de frequência (módulo) do sinal da fig. 3.3. $\frac{1}{T} = 143$ Hz

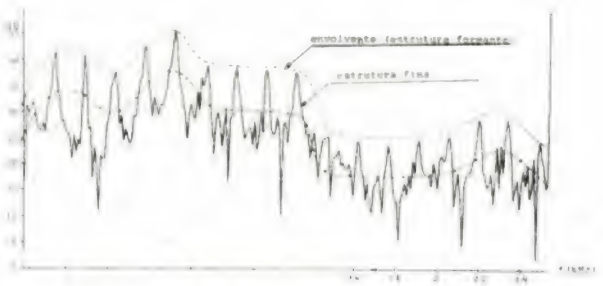



Fig. 4.2 — logaritmo do módulo do espectro de frequências do sinal da fig. 3.3. (último ponto sem significado)

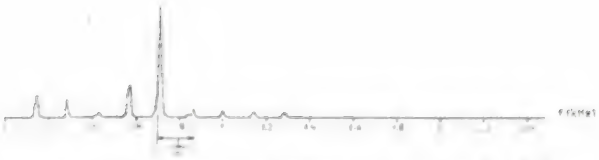


Fig. 4.3 — Espectro de potência do sinal da fig. 3.3

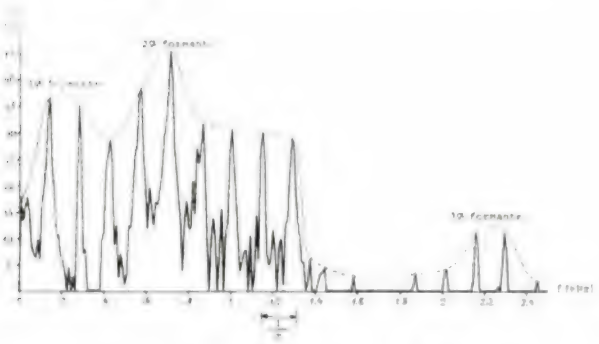


Fig. 4.4 — log $|F(\omega)|^2$ do sinal da fig. 3.3

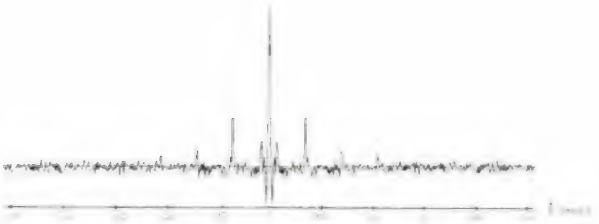


Fig. 4.5 — «Cepstrum» de frequência do sinal da fig. 3.3 ($TF^{-1}\{\log|F(\omega)|\}$) Pico máximo para $\tau = 7$ mseg (excluindo os picos em torno da origem).

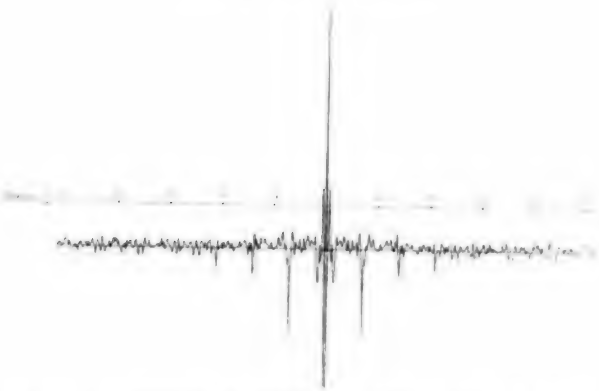


Fig. 4.6 — «Cepstrum» de potência do sinal da fig. 3.3 ($TF^{-1}\{\log(|F(\omega)|^2)\}$) Pico máximo: $\tau = 7$ mseg (excepto picos em torno da origem)

Façamos notar ainda que este método, além de extremamente útil para a determinação do «pitch», nos permite também conhecer as quefrências das formantes (que não são mais que os seus períodos) e é aliás o que fornece melhores resultados. E isto é muito útil para a síntese da voz como se faz nos «vocoders», como veremos no parágrafo 8.

Resta acrescentar que o ponto na origem ($\tau = 0$) não é relevante para os nossos fins (determinação das formantes e, principalmente, do «pitch), pois, como é óbvio, corresponde à componente contínua de $\log|F(\omega)|$ («Cepstrum» de frequência) ou de $\log|F(\omega)|^2$ («Cepstrum» de potência).

## 5 — «CEPSTRUM» DE POTÊNCIA E «CEPSTRUM» DE FREQUÊNCIAS

Para tornar os resultados mais evidentes podem elevar-se ao quadrado os módulos das transformadas inversas de Fourier das figuras 4.5 e 4.6. É ao quadrado do módulo da transformada inversa de Fourier do logaritmo do espectro de potência

$$|TF\{\log|F(\omega)|^2\}|^2$$

que Tukey chama «CEPSTRUM» [3], que é um anagrama da palavra espectro resultante da troca de domínios atrás referido. No entanto nós chamaremos «cepstrum» tanto a esta função como a $TF^{-1}\{\log|F(\omega)|\}$, bem como a $TF^{-1}\{\log|F(\omega)|^2\}$. O que nós vamos utilizar, contudo, será o segundo que chamaremos de «cepstrum» de frequência para o distinguir, quer do «cepstrum» de Tukey, quer do terceiro, a que chamaremos «cepstrum» de potência. No entanto, como vimos atrás, eles estão intimamente relacionados, dado que este último não é mais que duas vezes o «cepstrum» de frequência e o «cepstrum» de Tukey é quatro vezes o quadrado do «cepstrum» de frequência, o que para os nossos fins tanto faz. Com efeito:

$$\begin{aligned}
&\text{«Cepstrum» (de Tukey)} = \\
&= [TF^{-1}\{\log|F(\omega)|^2\}]^2 \\
&= [TF^{-1}\{2.\log|F(\omega)|\}]^2 \\
&= |2.TF^{-1}\{\log|F(\omega)|\}|^2 \\
&= 4|TF^{-1}\{\log|F(\omega)|\}]^2 \\
&= 4|\text{«cepstrum» de frequência}|^2
\end{aligned}$$

De notar que a quefrência se exprime em ciclos/ /(ciclos/seg) ou, simplesmente, em segundos.

Analisemos, por exemplo, os resultados obtidos com o sinal da figura 3.3 obtidos no capítulo anterior.

O sinal representado tem a duração de 102,4 mseg e apresenta quinze picos nesse intervalo de tempo pelo que a sua frequência fundamental é de cerca de 150 Hz ou seja $T \simeq 7$ mseg. O espectro de frequências, bem como o logaritmo do seu módulo, têm, portanto uma periodicidade de $1/T$ Hz $= 150$ Hz, o que se pode confirmar nas figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4. Nas figuras 4.5 e 4.6 vemos que os picos de amplitudes máximas, numa e noutra (exceptuando, evidentemente os picos em torno da origem que, como vimos, correspondem à estrutura formante) se verificam para $\tau = 7$ mseg.

Analizando mais atentamente as figuras referidas notamos que existem outros picos de amplitudes mais reduzidas para $\tau = 14$ mseg e $\tau = 21$ mseg. Se nos recordarmos do modo como foram obtidas, vemos que o último passo dado foi o cálculo de uma transformada (inversa) de Fourier, que além de determinar a «fre-

quência» fundamental do logaritmo do módulo da transformada de Fourier de f(t) (fig. 4.5) ou do logaritmo do quadrado desse módulo (fig. 4.6). determina todas as suas «harmónicas». Em geral os picos correspondentes a estas «harmónicas» estão dissimulados na irregularidade do cepstrum e não nos trazem, por isso quaisquer problemas.

Vejamos agora as razões que nos levaram a utilizar o «cepstrum» de frequência e não o «cepstrum» de potência. Para chegar a este último calculamos dois quadrados de módulos de espectros, o que não acontece na determinação do primeiro. Analisando, por exemplo, o módulo do espectro representado na figura 4.1, vemos que ele é constituído por um conjunto de picos de valor elevado numa dada faixa de frequências (entre zero e 1,3 kHz, aproximadamente) e que fora desta faixa e entre os picos tem valores baixos mas que nalgumas zonas de frequências têm alguma importância. Ao calcularmos o quadrado desta função reparámos que o computador cometia muitos erros resultantes das quantificações que um computador digital necessariamente faz, erros esses tanto mais importantes quanto menores forem os valores em jogo.

Assim, vemos na figura 4.3, o pico de valor mais elevado é posto mais em evidência, quando se calcula o quadrado, como seria de esperar, mas os quadrados dos valores baixos atrás referidos são arredondados para zero por se tornarem demasiado pequenos. O espectro de potência passa assim a ser, erradamente, um espectro de bandas, enquanto o espectro de frequência não o era. Este facto conduz a erros importantes quando se calcula o «cepstrum» de potência.

Analisemos, por exemplo, as figuras 5.1 e 5.2. Na primeira está traçado o «cepstrum» de frequência da secção do sinal falado «ATA» da figura 6.1, entre t = = 76,8 mseg e t = 102,4 mseg. Essa secção não foi obtida multiplicando o referido sinal pela função rectangular centrada em t = 89,6 mseg (ponto médio do intervalo considerado), mas sim pela janela representada na figura 6.2. A razão desta escolha será explicada no capítulo seguinte, não interessando neste momento, pois o que nos propomos é mostrar que o «cepstrum» de potência de um sinal qualquer pode conduzir a erros importantes utilizando os meios de cálculo que nós usámos. Na segunda está representado a $TF^{-1}\{\log |F(\omega)|^2\}$, que é o nosso «cepstrum» de potência. Já vimos atrás que este é o quádruplo do quadrado do módulo daquele, o que, é fácil de ver, não se verifica. O «cepstrum» de potência, devido às razões atrás apontadas, não conduz a resultados satisfatórios.

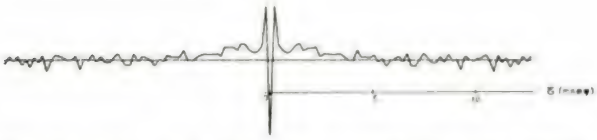
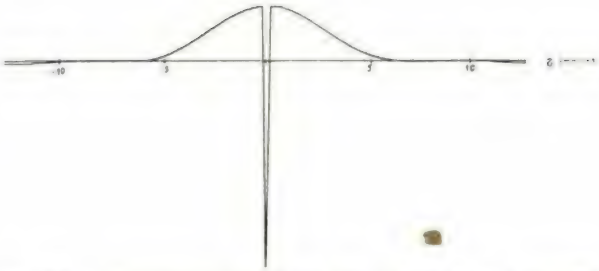


Fig. 5.1 — «Cepstrum» frequência da secção de sinal representado na fig. 6.1 entre t = 76,8 mseg e t = 102,4 mseg



Fg. 5.2 — «Cepstrum» de potência da secção de sinal referida na figura anterior

## 6 — «SHORT-CEPSTRUM»; ANÁLISE TEÓRICA. «TAPERING» — JANELA NO TEMPO

A técnica de «Cepstrum» pode aplicar-se a um sinal de qualquer comprimento no tempo e o que se fez até agora foi determinar o «cepstrum» de um sinal com uma determinada duração no tempo, mas tomado sempre como um sinal inteiro.

Este é o método utilizado no estudo de sinais sísmicos, e de um modo geral, de todos aqueles em que o que se pretende determinar é a existência de um ou vários ecos e os respectivos tempos de ocorrência, relativamente ao sinal «principal».

Mas no caso do sinal falado, a periodicidade do sinal emitido pela fonte vai variando no tempo, e há mesmo porções do sinal falado que são aperiódicas.

Considere-se, por exemplo, o sinal falado da figura 6.1, que foi recolhido, amostrado, registado e traçado nas mesmas condições dos sinais das figuras 3.1 e 3.3. Trata-se da palavra «ATA» (do verbo atar) dito por uma pessoa do sexo masculino, com a duração aproximada de 200 mseg (o filtro utilizado para filtrar tanto este sinal como os dois referidos atrás foi um filtro B.W. passa-baixo 0 — 2500 Hz). Este sinal é constituído por três partes distintas: a primeira (0 a 50 mseg, aproximadamente), diz respeito a um som quasi-periódico («voiced») a que corresponde um «pitch», eventualmente variando no tempo; a segunda (aproximadamente entre 50 e 150 mseg), é um som não periódico («unvoiced») e corresponde à pronunciação do som T, durante o qual

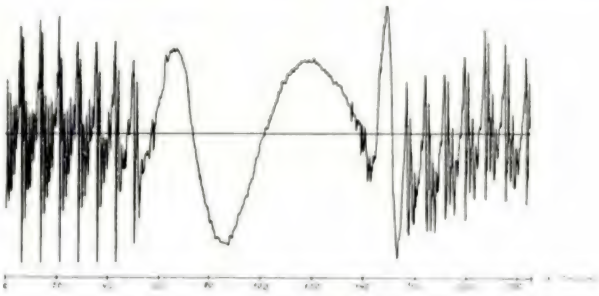
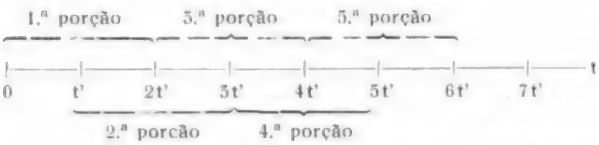


Fig. 6.1 — Sinal falado «ATA» dito por um indivíduo do sexo masculino, filtrado entre 0 e 2,5 kHz (frequência de amostragem: 5 kHz).

(3) Aqui fica mostrada a necessidade destas hipóteses, como se havia prometido no parágrafo 2. No próximo parágrafo se mostrará a sua validade.

não há admissão de ar através das cordas vocais e ao qual não há pois que atribuir qualquer «pitch»; a terceira parte é idêntica à primeira.

Como a característica «voiced-unvoiced» do sinal falado vai variando no tempo, bem como o período do sinal da fonte, convém-nos analizar o sinal por secções, isto é, considerando primeiramente um troço do sinal entre $t = 0$ e $t = 2t'$ e obter o «cepstrum» dessa porção de sinal, analizando se ela é «voiced» ou unvoiced» e no primeiro caso qual o «pitch» que lhe corresponde. Em seguida consideramos outra porção, que no nosso caso do sinal da figura 6.1, é entre $t = t'$ e $t = 3t'$ repetindo a análise feita para a primeira, e assim sucessivamente. De notar que a análise passa a ser feita por saltos de $\Delta t$, no nosso caso $\Delta t = t'$, e que as diversas porções (todas elas com a mesma duração — no nosso caso 2t') se podem sobrepor. Esquematicamente (para o nosso caso):




É neste ponto que é necessária a hipótese feita na página 8, de que tanto o «pitch» do sinal falado, como a função de transferência do tracto vocal $H(\omega)$ variam lentamente com o tempo. Com efeito a divisão do sinal falado em porções, como atrás é referido, destina-se a atribuir a cada uma delas a classificação de «voiced» ou «unvoiced» e, no primeiro caso, um determinado «pitch», que se considera constante em cada uma delas. Ora, se as variações do «pitch» e da função de transferência $H(\omega)$ com o tempo fossem muito rápidas, isto seria manifestamente impossível de fazer. Não seria possível atribuir a uma dada porção do sinal a característica de «voiced» ou «unvoiced» e muito menos um «pitch» determinado.

A duração das porções (2t') bem como os saltos $\Delta t$ deevm ser escolhidos conforme as velocidades de variação do «pitch» e de $H(\omega)$.

No nosso caso, foram julgados suficientes saltos e porções de 12,8 e 25,6 mseg respectivamente, que, como veremos no próximo parágrafo conduziram a resultados aceitáveis. Aí veremos igualmente que é válida a hipótese das pequenas variações para o «pitch» e para $H(\omega)$.(3)

Ao seccionarmos o sinal falado, o que estamos realmente a fazer é a multiplicá-lo por uma função rectangular. Este facto vai dificultar-nos os cálculos pois vai-nos introduzir na porção de sinal a analisar frequências não existentes no sinal inicial. Vai haver um enriquecimento especialmente no que diz respeito às altas frequências.

Vamos analisar, seguidamente, qual é este efeito, como se dá e como o poderemos resolver utilizando, em vez de uma função rectangular, uma outra janela no tempo especialmente escolhida.

Sendo o sinal a analisar

$$f(t) = p(t) * h(t) \qquad (6.1)$$

multipliquemo-lo por uma dada função $w(t)$:

$$g(t) = f(t).w(t) = \{ p(t) * h(t)\}.w(t) \qquad (6.2)$$

$w(t)$ é a função utilizada como janela, que tanto pode ser a função rectangular como outra qualquer.

O sinal $p(t)$, da fonte, representado graficamente na figura 2.1 pode ser expresso por uma soma de uma sério infinita do sinais idênticos $p_0(t)$, repetidos cada T segundos, sendo T o «pitch» de $p(t)$, isto é:

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} p_0(t-nT) \qquad (6.3)$$

$$= p_0(t) * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta\ (t-nT) \qquad (6.4)$$

Substituindo em (6.2) teremos:

$$g(t) = \{[p_0(t) * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta\ (t-nT)] * h(t)\}.w(t) \qquad (6.5)$$

e a transformada inversa de Fourier deste sinal é:

$$G(\omega) = \left\{ \left[ P_0(\omega).\ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (\omega - n\frac{2\pi}{T}) \right] . H(\omega) \right\} * w(\omega) \qquad (6.6)$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ H(\omega).\ P_0(\omega).\ \delta(\omega - n\frac{2\pi}{T}) \right\} * w(\omega) \qquad (6.7)$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ H(n\frac{2\pi}{T}).\ P_0(n\frac{2\pi}{T}).\ \delta(\omega - n\frac{2\pi}{T}) \right\} * w(\omega) \qquad (6.8)$$

Deste modo, o espectro de frequências do sinal falado é formado por impulsos espaçados de 1/T Hz e com amplitude $H(n\,2\pi/T).\ P_0(n\,2\pi/T)$ se o sinal falado não foi limitado no tempo ($w(t) \neq 0$, excepto para valores isolados do t), o que aliás já tinhamos visto atrás.

Não sendo o sinal limitado no tempo é limitado na frequência, ou seja, o seu espectro de frequências é nulo para valores de $\omega$ tais que $|\omega| > \omega_{max.}$

Sendo, o sinal falado, limitado no tempo pela janela $w(t)$, o efeito desta janela, traduz-se, no espectro de frequências, pela convolução do espectro de frequências do sinal como se ele fosse ilimitado no tempo e portanto, limitado na frequência, com o espectro de frequências de $w(t)$, ilimitado na frequência. Quer isto dizer que o espectro de $g(t) = f(t).w(t)$ não é limitado na frequência (vão-nos aparecer frequências estranhas a $f(t)$ devido à janela no tempo $w(t)$ ) sendo ainda os picos que apareciam em $F(\omega)$ alargados e tornados com a forma de $W(\omega)$.

O espectro de frequências da janela no tempo, função rectangular é:

(3) Aqui fica mostrada a necessidade destas hipóteses como se havia prometido no parágrafo 2. No próximo parágrafo se mostrará a sua validade.

$$W(\omega) = \frac{T_w}{2} \frac{\operatorname{sen} \omega \frac{T_w}{2}}{\frac{T_w}{2}} \qquad (6.9)$$

sendo $T_w$ o intervalo de tempo em que a janela toma

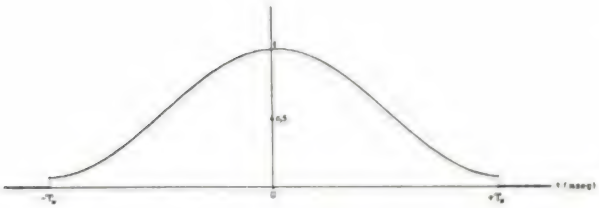


Fig. 6.2 — Janela no tempo $w(t) = 0{,}54 + 0{,}46 \cos\left(\frac{\pi t}{T_w}\right)$ $|t| \leq T_w$

$w(t) = 0$ $|t| > T_w$

valores não nulos, o que vem ilustrar o que foi dito atrás.

Assim, se nos limitarmos a seccionar o sinal, o que equivale a multiplicá-lo pela janela no tempo — função rectangular — os picos de $F(\omega)$ são alargados, tomando a forma da função cuja expressão é (6.9), do que resulta uma distorção nos resultados, impedindo, muitas vezes a determinação do «pitch». Este é o rpoblema que se põe para os sinais de banda estreita, como já referimos atrás, pois é para estes que, naturalmente, se verificam as maiores distorções no seu espectro de frequências e, portanto, no seu «cepstrum», não permitindo, geralmente que se detecte o «pitch» de tais sinais.

O problema que se nos põe agora é escolher convenientemente uma janela no tempo $w(t)$, de modo que, não sendo o espectro de frequências de $g(t)$ limitado na frequência, possa contudo ser aproximadamente considerado como tal. Se o espectro $W(\omega)$ da janela for aproximadamente limitado na frequência, os picos de $F(\omega)$ não serão muito arredondados, não haverá um excessivo enriquecimento em frequências que não pertençam a $f(t)$ e obtêm-se os resultados desejados.

Por isso a janela no tempo deve ter um espectro de frequências com um lobo principal o mais largo possível e com os lobos secundários com a menor amplitude possível. Estas duas exigências são mutuamente exclusivas, pelo que é necessário tomar uma solução de compromisso.

Uma boa janela no tempo, tomando em atenção o que se disse anteriormente, é a que tem por expressão

$$w(t) = 0{,}54 + 0{,}46 \cos\left(\frac{\pi t}{T_w}\right) \qquad \text{para } |t| \leq T_w$$

$$w(t) = 0 \qquad \text{para } |t| > T_w$$

em que $2\,T_w$ é o intervalo de tempo da secção do sinal a analizar, e que tem a forma representada na figura 6.2.

Fig. 6.3 — Secção entre $t = 0$ e $t = 25{,}6$ mseg do sinal falado «ATA» da fig. 6.1

Fig. 6.4 — Sinal da fig. 6.3 multiplicado pela janela da fig. 6.2 ($T_w$ = 12,8 mseg) (Abreviadamente: com «tapering»)

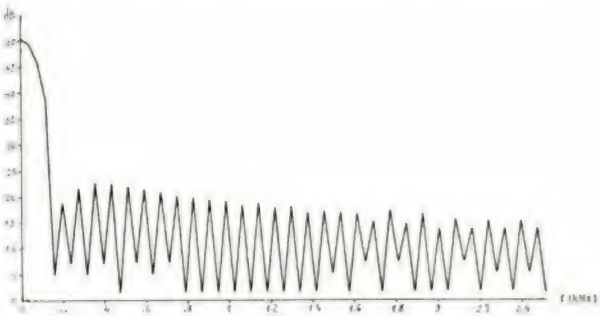


Fig. 6.5 — Espectro de frequências da janela da fig. 6.2 (módulo em dB)

Nas figuras 6.3 e 6.4 estão representados respectivamente a secção entre 0 e 25,6 mseg do sinal da figura 6.1 e o produto desta pela janela representada na figura 6.2.

A janela descrita atrás apresenta uma relação lobo principal-lobos secundários de 25 dB, como se pode ver na figura 6.5, onde está traçado o espectro de frequências dessa janela.

Resta acrescentar que com esta janela se obtêm bons resultados como se verá no parágrafo seguinte, mas que é possível chegar a bons resultados igualmente utilizando outras janelas, como acontece por exemplo em [6].

## 7 — «SHORT-CEPSTRUM» DE UM SINAL FALADO: ANÁLISE DOS RESULTADOS

Vamos apresentar, neste capítulo, os resultados obtidos pela aplicação da técnica atrás descrita, e que é conhecida pela técnica de short-cepstrum, ao sinal falado «ATA» da figura 6.1. A janela utilizada, e que foi definida no parágrafo anterior, tem uma duração de 25,6 mseg como então se disse, e o «short-cepstrum» foi feito por intervalos de 12,8 mseg. Dado que o sinal completo tem uma duração de 204,8 mseg, obtivemos 15 «cepstra». De referir, antes de procedermos à sua análise, que o sinal foi dito por uma pessoa do sexo masculino, captado, filtrado, amostrado e registado nas mesmas condições que o sinal da figura 2.2 (captado por um microfone de condensador de alta qualidade, filtrado por um

filtro B.W. entre 0 e 2500 Hz, amostrado pelo conversor AD do Fourier Analyser, unidade periférica do computador digital HP 2116C que registou o sinal e, em seguida executou todos os cálculos).

Nas figuras 7.1 a 7.9, inclusive, apresentam-se três secções de sinal, os seus espectros logarítmicos e os seus «cepstra» de frequência, que a partir deste momento passaremos a chamar simplesmente de «cepstra» dado que o que utilizamos sempre são os de frequência.

As duas secções das figuras 7.1 e 7.4 são as duas primeiras, respectivamente entre t = 0 e t = 25,6 mseg e entre t = 12,8 mseg e t = 38,4 mseg e que, como já dissemos se sobrepõem. Tanto numa como noutra é possível, por análise directa, determinar o «pitch», pelo menos de uma forma aproximada, e ter uma ideia da sua estrutura formante por análise do espectro logarítmico. Nos «cepstra» vemos imediatamente que o «pitch», tanto num como noutro é de 7,4 mseg e que, portanto, não variou. A secção de sinal da figura 7.7 é de uma região do sinal em que este é «unvoiced», como é evidente, não apresentando, por isso, qualquer «pitch», como se torna explícito por análise do seu «cepstrum».

Fig. 7.1 — Secção entre t = 0 e t = 25,6 mseg do sinal falado «ATA» dt fig. 6.1

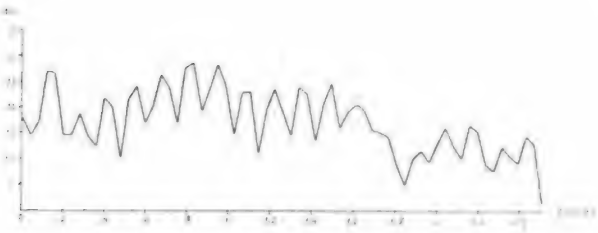


Fig. 7.2 — Módulo (em dB) do espectro do sinal da fig. 7.1 com «tapering»

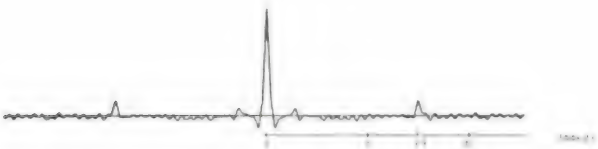


Fig. 7.3 — «Cepstrum» do sinal a que se refere a figura acima c/«tapering») Pico para $\tau$ = 7.4 mseg

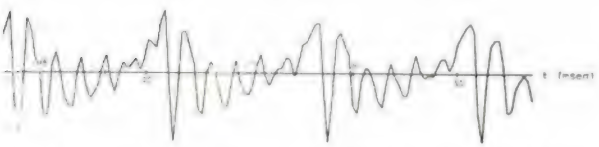


Fig. 7.4 — Sinal falado «ATA» entre t=12,8 mseg e t=38,4 mseg

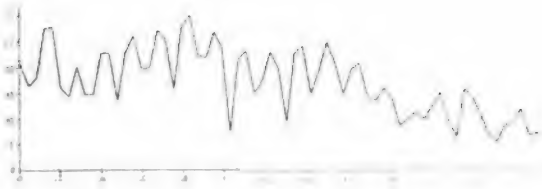


Fig. 7.5 — Módulo (em dB) do espectro do sinal da fig. 7.4, c/«tapering»

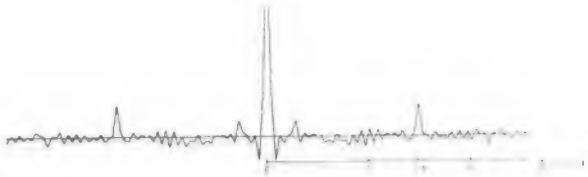


Fig. 7.6 — «Cepstrum» do sinal a que se refere a figura anterior (c/«tapering») (Pico cortado por ser irrelevante)

Fig. 7.7 — Sinal falado «ATA» entre t = 64 e t = 89,6 mseg

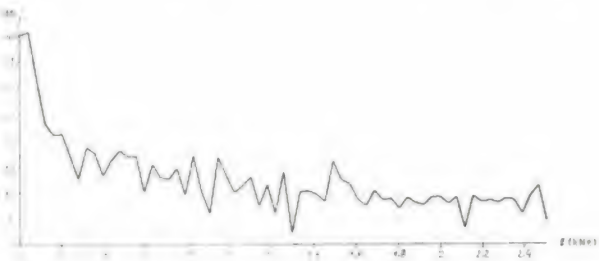


Fig. 7.8 — Módulo (em dB) do espectro de frequências do sinal da fig. 7.7 c/«tapering»

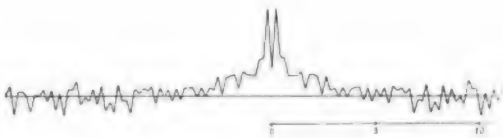


Fig. 7.9 — «Cepstrum» do sinal a que se refere a figura anterior c/tapering

Na figura 7.10 estão representadas todas as secções consideradas e que se apresentam para uma crítica dos resultados obtidos. Na figura 7.11 estão representados o espectros logarítmicos dessas secções do sinal, bem como o «short-cepstrum». Resta-nos fazer uma análise dos resultados obtidos.

Os quatro primeiros «cepstra» apresentam picos bem nítidos para $\tau$ = 7,4 mseg correspondentes ao «pitch» T = 7,4 mseg. No terceiro «cepstrum» os seus valores para $\tau$ = 7,2 e $\tau$ = 7,4 mseg são muito próximos. Como o que está traçado entre eles não tem significado, pois que, como o computador é digital, os resultados são apresentados sob a forma digital e o que está traçado

entre eles é uma interpolação linear feita para o «plotter» poder traçar continuamente o gráfico, o que temos efectivamente são dois pontos de amplitudes semelhantes. Podemos considerá-los como fazendo parte de um pico largo ou como sendo dois picos separados, mas em ambos os casos a ilacção a tirar é a mesma: dentro do intervalo considerado o «pitch» tem uma variação rápida e que, portanto, este intervalo entre t = 25,6 e t = 51,2 mseg tem, por assim dizer, dois «pitch».

Note-se, a propósito do que acaba de dizer-se, que a janela no tempo atrás considerada, e que foi usada neste exemplo, «olha» principalmente para a região central do sinal, dado que as regiões laterais são de pequena amplitude. Disto resulta que o pico que aparece no «pitch» nunca é muito largo dado que o «pitch» que é predominantemente detectado é o da região central do intervalo de 25,6 mseg de que se fez o «cepstrum». É possível, no entanto, que por vezes apareçam em torno do pico principal, picos de pequena amplitude correspondentes a uma variação do «pitch», ou um pequeno alargamento do pico, devido à mesma razão, o que não parece ter importância de maior. Se o pico aparecer muito alargado, ou se aparecerem vários picos de amplitudes semelhantes é peferível fazer uma análise mais fina, utilizando intervalos mais pequenos e fazendo o «short--cepstrum» por saltos menores.

No quarto intervalo, o cálculo do «cepstrum» conduz-nos a um pico para $\tau$ = 7,4 mseg, mas este pico é já de pequena amplitude porque, como podemos ver na figura 7.10, estamos numa secção em que se faz a transição da região em que o som é «voiced» para uma região em que o som é «unvoiced».

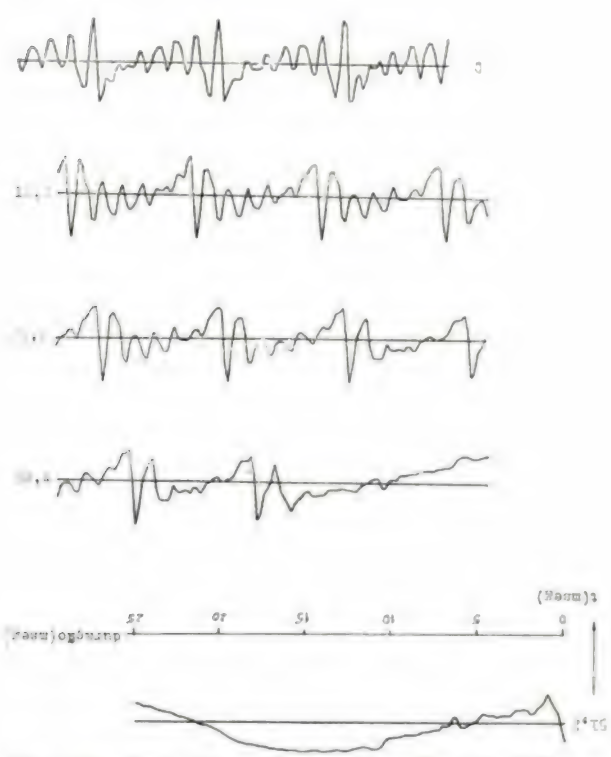


Fig. 7.10 — Sinal falado «ATA» por secções de 25,6 mseg sobrepostas

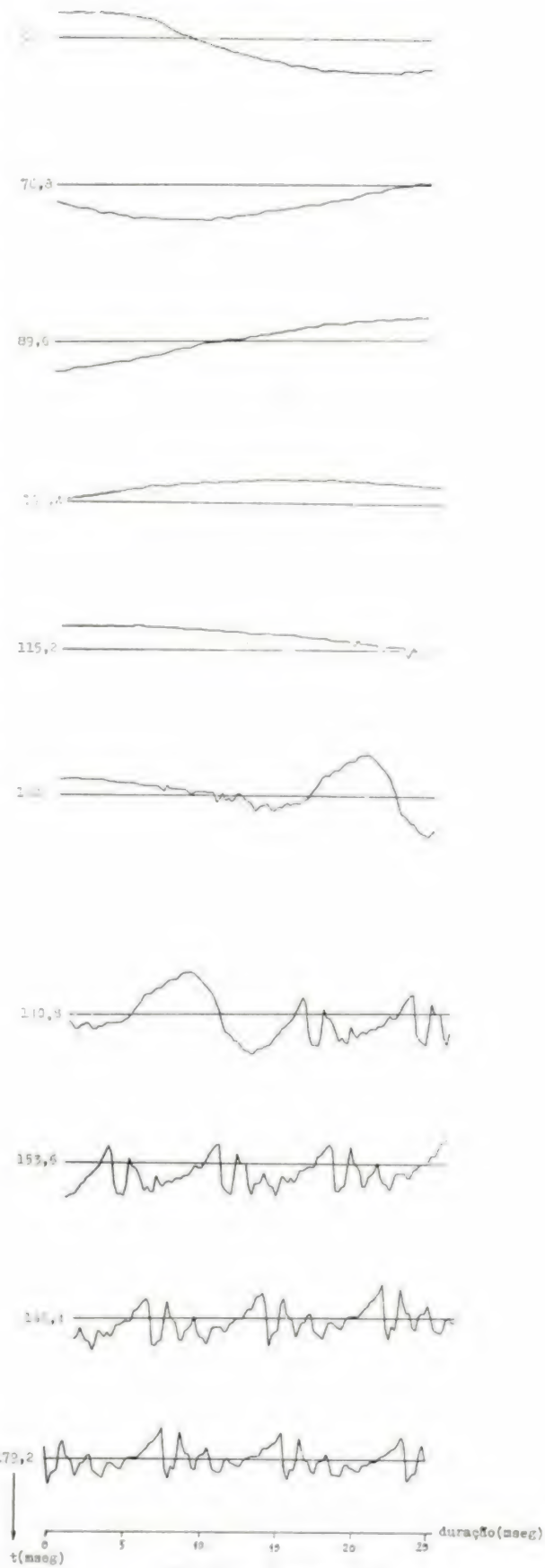



Fig. 7.10 — (continuação)

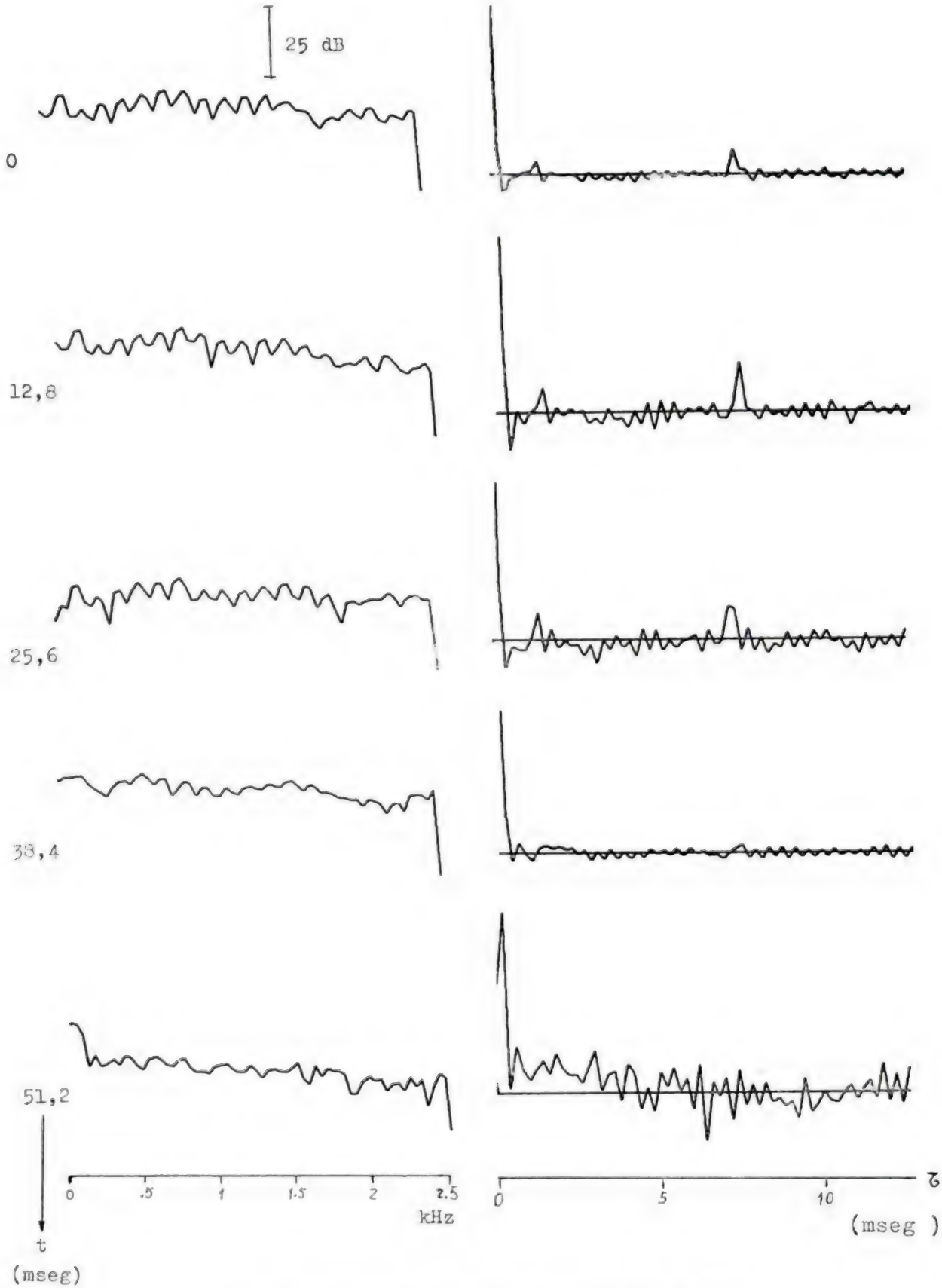



Fig. 7.11 — Espectro logaritmico e «short-cepstrum» do sinal «ATA»

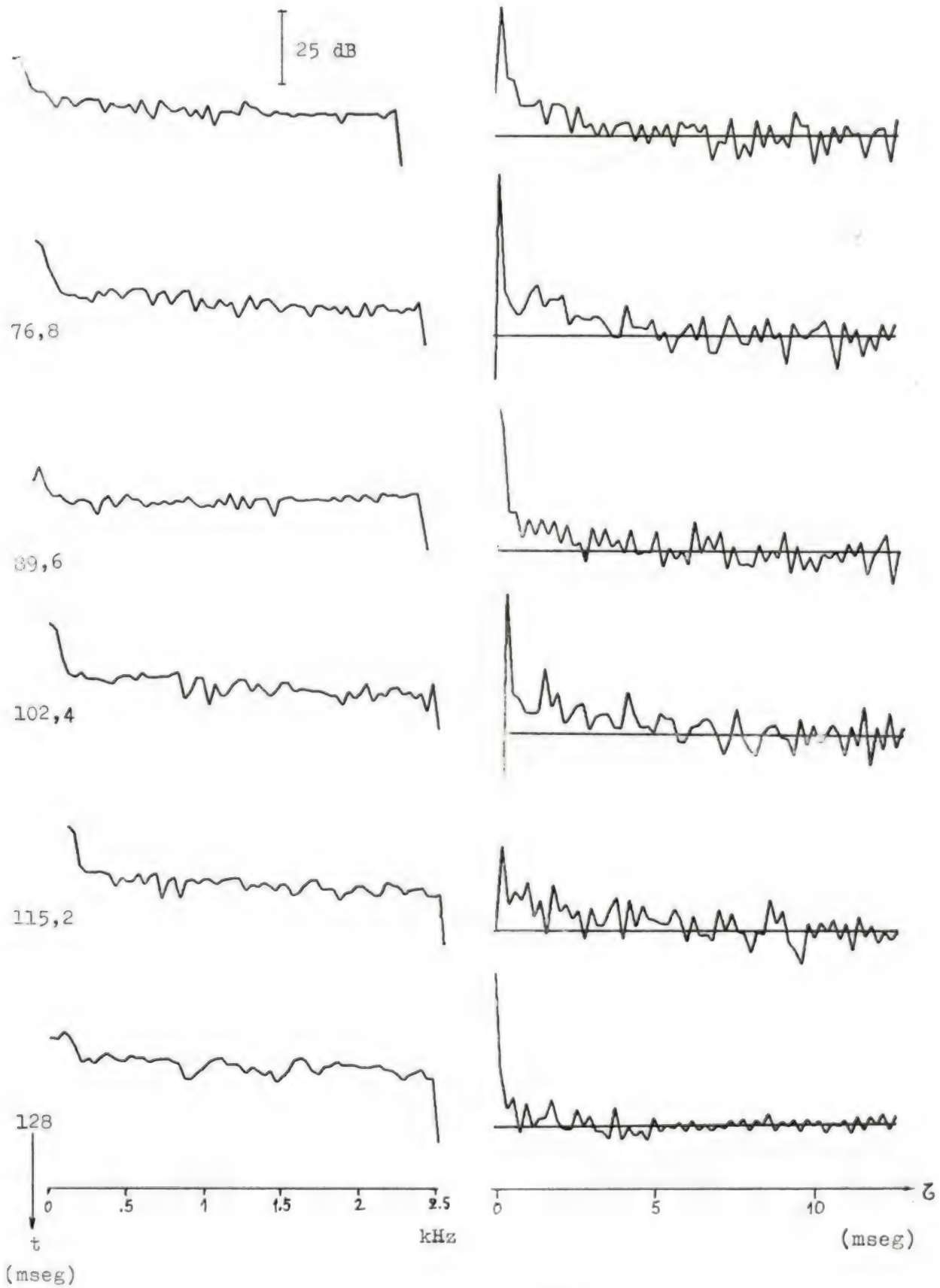



Fig. 7.11 — (continuação)

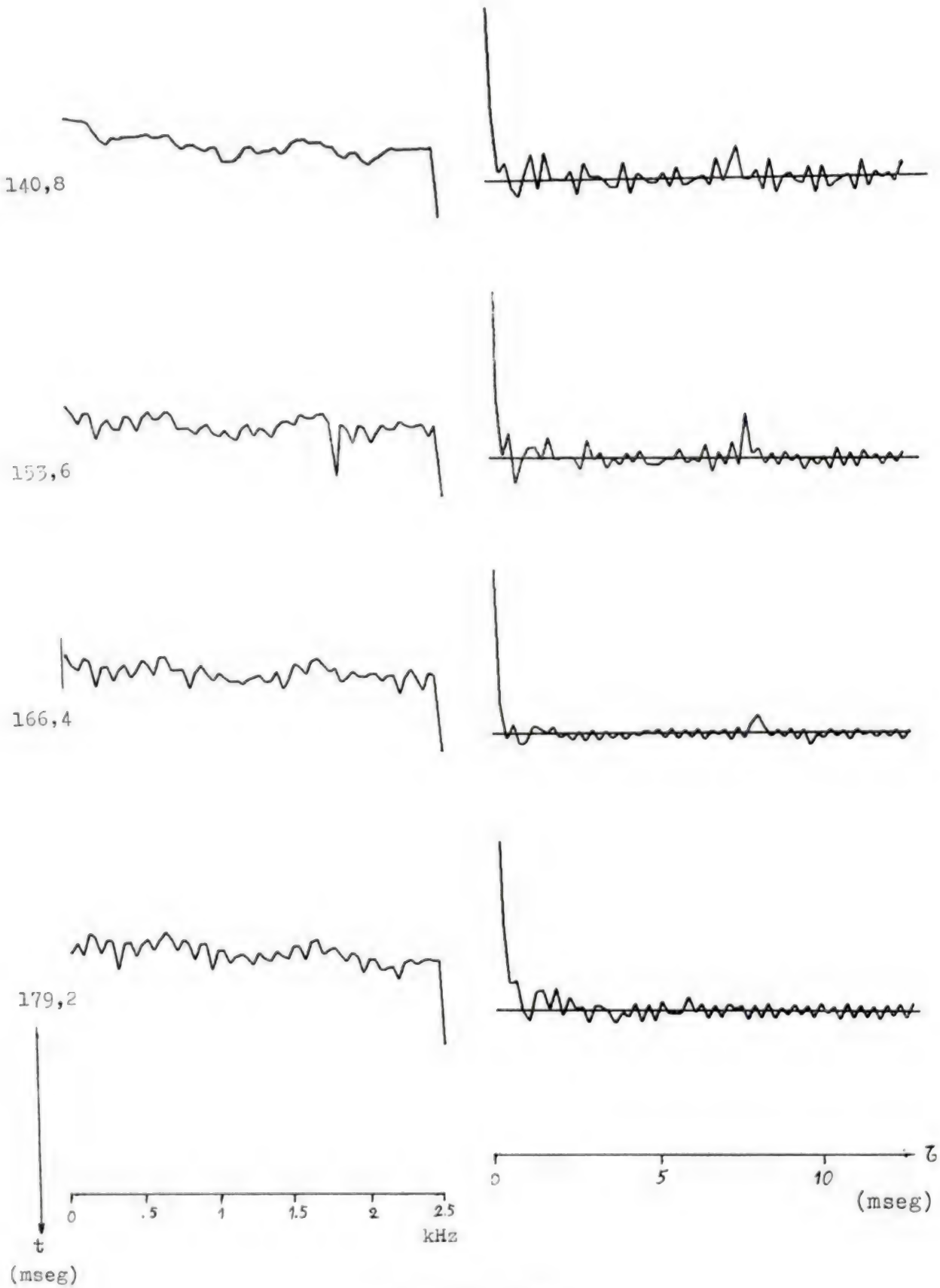



Fig. 7.11 — (continuação)

No quinto intervalo estamos já, nitidamente, dentro desta região, não aparecendo, consequentemente, nenhum pico correspondente a qualquer «pitch». Nesta região os picos mais importantes são os que correspondem às formanto e que se veem para pequenos valores de $\tau$. Estas formantes são as que modelam, nos sons «unvoiced», ruídos produzidos na cavidade vocal. Este assunto é tratado mais em pormenor no parágrafo seguinte, sendo suficiente notar, por ora, que a determinação destas formantes é tão importante como a das formantes dos sons «voiced».

Nas secções 6 a 10, inclusive, os sinais correspondem sempre a sons «unvoiced» e, por isso, os resultados são idênticos aos da secção 5.

Na secção 11, voltamos a estar numa região de transição, mas desta vez, de um son «unvoiced» para um som «voiced», bem como no intervalo 12, mas em ambos os picos são tão pequenos que se confundem com as irregularidades do «cepstrum».

Nas secções 13 e seguintes, os picos voltam a aparecer de novo nitidamente. É possível notar uma variação lenta do «pitch» até ao final do sinal, pois os picos nas regiões 13, 14 e 15 correspondem respectivamente a $\tau = 7{,}6$, $\tau = 7{,}8$ e $\tau = 8{,}0$ mseg.

Resta acrescentar que em todos os espectros logarítmicos aparece um último ponto (e a interpolação linear entre eles e o penúltimo) que não tem qualquer significado, pois é um erro de cálculo devido ao processo de cálculo utilizado pelo Fourier Analyser.

O processo aqui utilizado pode agora ser usado para estudar outro sinal qualquer.
sentar exemplos com outros sinais, o que não fizemos por não dispormos de tempo.

Seria interessante obter «cepstra» para outros sinais e verificar alguns fenómenos conhecidos, como por exemplo, o facto de o «pitch» de um dado som «voiced» dito por um indivíduo do sexo feminino ser metade do «pitch» do mesmo som dito por indivíduos do sexo masculino, a duplicação do «pitch» nalguns sons, como por exemplo o som inglês «...ing», etc.

## 8 — APLICAÇÃO: «VOCODERS» — ANÁLISE ESPECTRAL E SÍNTESE DA VOZ

Neste parágrafo vamos ver uma aplicação do estudo feito nos parágrafos anteriores.

Esta aplicação traduz-se no «Vocoder», designação derivada das palavras «voice» e «coder».

Inicialmente o «vocoder» foi concebido como um meio para uma eficiente transmisão do sinal falado, especialmente para longos e caros circuitos telefónicos.

Na realidade, numa transmissão vulgar de telefonia, a banda ocupada por uma chamada é aproximadamente de 3000 Hz, dos 200 aos 3200 Hz. Esta banda é suficiente para assegurar uma boa qualidade e inteligibilidade da voz ([4]). Contudo Dudley mostrou apenas uma falados poderiam ser transmitidos utilizando apenas uma fracção dessa banda se métodos próprios de código fossem usados. O «vocoder» foi assim o primeiro projecto para realizar essa economia.

Actualmente a voz sintética dos «vocoders» tem-nos resolvido os problemas da qualidade da voz resultantes do elevado nível do ruído, da distorção não linear, da distorção de frequência, etc.

As aplicações dos vocoders têm aumentado e alargado o seu primitivo âmbito. Actualmente, entre outras aplicações, ajudam os surdos a «sentir» os sons da voz (tactile-«vocoders»), assim como têm tido larga aplicação no ensino de línguas estrangeiras.

Uma das suas mais importantes aplicações, tem sido no armazenamento do sinal falado.

Para o estudo dos «vocoders» é necessário entrar em conta, quer com a análise espectral da voz, quer com a sua síntese, o que nos leva a estudar as propriedades do ouvido humano.

É necessário considerar as suas três principais propriedades no que diz respeito à sua sensibilidade ao som falado:

1) O ouvido constitui um analisador espectral em «short-time».

2) Para uma percepção não estereofónica, o ouvido é relativamente insensível à fase.

3) O ouvido é excelentemente sensível ao «pitch».

No espectro do ouvido ser insensível à fase, deve-se precisar que a fase é um factor relativamente sem importância, tendo alguma influência na qualidade da voz, mas sem efeito na inteligibilidade da mesma quando se trata de sinais falados não estereofónicos.

Deve-se notar contudo que distorções de fase correspondentes a distorções de atrazo superiores a 50 mseg já têm efeitos notáveis na qualidade da voz.

O facto do ouvido ser bastante sensível ao «pitch», deve-se ao grande poder descriminatório na frequência da percepção auditiva. Por exemplo, para uma componente de frequência perto dos 1000 Hz, têm sido detectadas diferenças tão notáveis como sòmente 3 Hz. O exacto mecanismo desta assombrosa descriminação de frequências (a qual parece violar a relação de incerteza $\Delta f . \Delta t \geqslant 1$) é ainda desconhecido.

A maioria dos métodos de análise e síntese da voz são baseados na descrição paramétrica do «short-cepstrum» ou de representações equivalentes, das quais é de salientar o logaritmo do módulo do espectro de potência do sinal, visto que se o «short-cepstrum» permite conhecer com exactidão o «pitch», aquele dá-nos a

(4) Durante o nosso trabalho temos apresentado o sinal falado filtrado entre 0 e 2500 Hz, o que comparado com o que acabamos de mencionar acerca da banda telefónica (200-3 200 Hz) justifica um esclarecimento.

Na realidade, o facto de usarmos a banda 0 — 2500 Hz foi imposto pelo material que tínhamos à nossa disposição (frequência de amostragem do computador limitando o máximo da banda). Contudo o sinal falado filtrado entre 0 e 2500 Hz não difere sensivelmente do filtrado entre 200 e 3200 Hz, apresentando igualmente inteligibilidade e boa qualdade. Especialmente no que respeita ao «pitch», a frequência que lhe corresponde está sempre abaixo dos 2500 Hz e no que respeita às formantes, como veremos adiante, os seus valores encontram-se, geralmente, abaixo dos 2500 Hz.

conhecer as frequências e amplitudes das formantes.

O mais antigo método de análise-síntese da voz empregando uma descrição paramétrica do «short-cepstrum e do «short-time» logaritmo do módulo do espectro de potência é «spectrum-channel vocoder».

Neste, a envolvente espectral, espectro das formantes) $H(\omega, t)$ é representado geralmente por 10 a 20 amostras espaçadas ao longo do eixo da frequência

O espectro da estrutura fina (sinal «voiced») $|P(\omega, t)|$ por um parâmetro adicional que mede o «pitch» ou a correspondente frequência fundamental $f_0$ dos sons «voiced» e é igual a zero para os sons «unvoiced» ou silêncio.

Um diagrama-bloco de um «spectrum-channel vocoder» é mostrado na figura 8.1.

O sinal falado é separado em 14 bandas espectrais contínuas com larguras de banda entre 100 e 400 Hz cobrindo as frequências de 200 a 3200 Hz. Esta largura de banda, típica em sinais telefónicos permite alta inteligibilidade e boa qualidade como já foi dito.

A saída de cada filtro é ligada a um rectificador seguido de um filtro passa-baixo, à saída do qual temos o valor médio no tempo da amplitude do sinal resposta ao impulso unitário do tracto vocal para cada banda de frequências.

Repare-se que o detector «voiced» — «unvoiced» utiliza geralmente o resultado do detector do «pitch» (por razões de economia de meios) ou seja, a técnica de «cepstrum», podendo, por exemplo, o bloco detector «voiced» — «unvoiced» funcionar do seguinte modo: mede as amplitudes de todos os picos que aparecem no «cepstrum» e analisa (por comparação) se existe algum muito maior que todos os restantes, decidindo que o sinal é «voiced» em caso afirmativo e que é «unvoiced» em caso negativo.

Os 14 canais referidos representam no seu conjunto a envolvente do «short-time» logaritmo do módulo do espectro do sinal falado, ou sejam as formantes.

Um detector «voiced» — «unvoiced» e um detector do «pitch» fixam a estrutura fina do sinal falado e produzem um sinal correspondente de banda estreita.

Estes 15 sinais (14 canais mais o «pitch») combinam-se num único sinal de $15 \times 20$ Hz.

Como se vê, a banda de transmissão é somente um décimo da requerida inicialmente para transmitir o sinal falado.

Chama-se a atenção que na prática é necessária uma banda adicional para a separação do sinal transmitido em canais individuais de sinal.

Para uma transmissão digital, a economia ainda é maior. Assim para uma amostragem de 40 por segundo, transmitindo três «bits» por amostra para o sinal dos 14 canais e 6 «bits» por amostra para o «pitch», a saída do analizador «vocoder» pode ser representada por um total de $40.(14 \times 3 + 6) = 1920$ «bits» por segundo, isto é, menor que um vigésimo do número de «bits» por segundo necessário para representar o sinal falado original (49 000 «bits» por segundo).

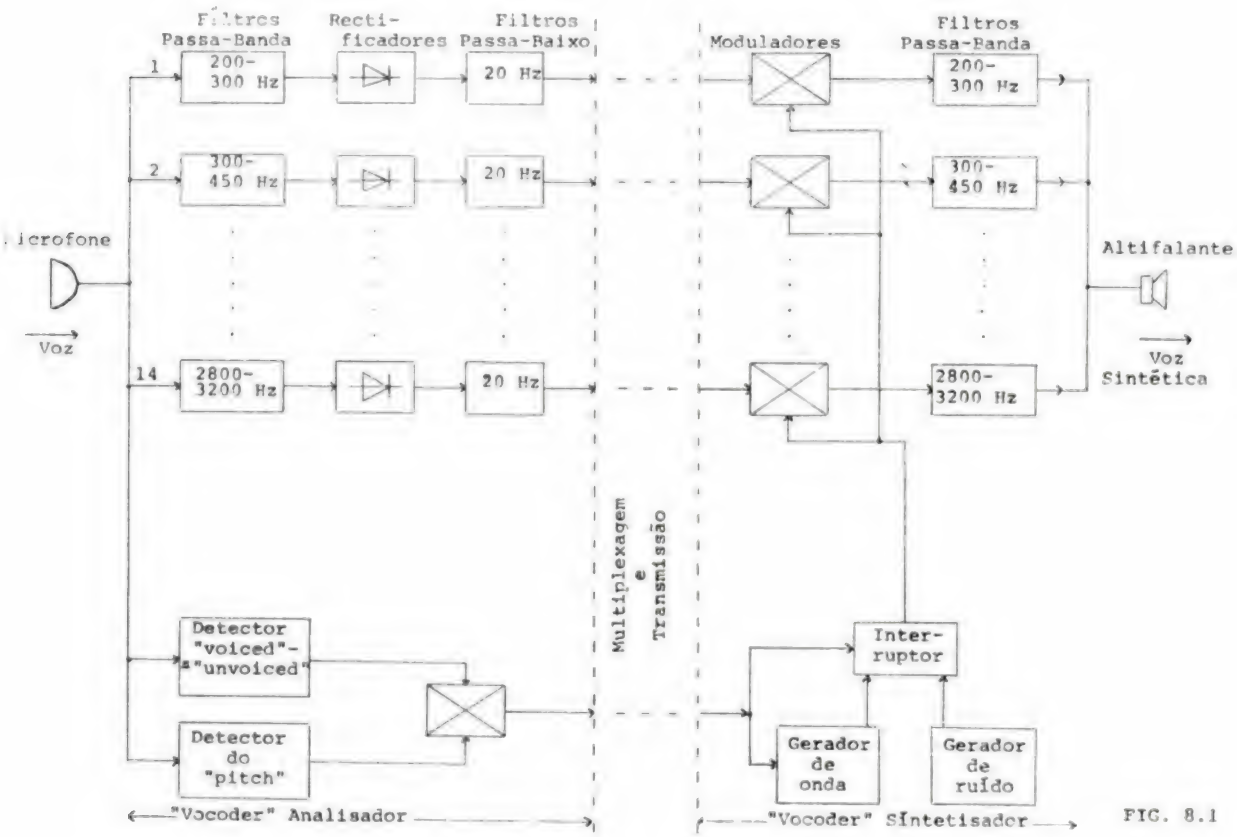



FIG. 8.1

Contudo a qualidade da voz dos «vocoders» existentes, funcionando com tão baixo valor de «bits» é notoriamente inferior.

No sintetisador, os sinais dos 14 canais são utilizados para modular um sinal (com espectro de frequências plano) de frequência correspondente ao «pitch» para os sons «voiced» ou ruído branco para os sons «unvoiced», sendo em seguida filtrados pela correspondente banda.

Um «vocoder» de canal espectral como o que descrevemos foi construído primeiramente por H. W. Dudley.

Apesar da grande economia alcançada, na transmissão da envolvente espectral em termos de amostras espectrais, esta ainda pode ser melhorada. A razão reside em que amostras espectrais, especialmente de sinais de canais adjacentes do «vocoder» estão significativamente correlacionadas. Assim Kramer e Mathews sugeriram uma transformação linear dos sinais de canal num pequeno número de sinais não correlacionados antes da transmissão [3]. Reduções de cerca de dois para um no número de canais têm sido realizadas na prática por este método.

Um outro método para reduzir o número de canais activados é conhecido por «peak-picking».

Resumidamente, consiste em transmitir os sinais das canais que num dado instante são maiores (tipicamente um terço do seu número são máximos relativos num dado instante). Assim vemos que uma redução de três para um pode ser conseguida.

Para uma transmissão digital, mesmo tendo em conta a banda adicional necessária para transmitir os números dos canais seleccionados a economia é grande.

Seguidamente, iremos indicar outros tipos de «vocoders», assim como, resumidamente, as bases em que se fundamentam.

Começamos pelos «vocoders» de formantes («formant-vocoders»). As envolventes espectrais de muitos dos sons falados são caracterizadas por máximos que representam as ressonâncias do tracto vocal, ou seja, as formantes. Ora, sabemos também que abaixo dos 3000 Hz, existem tipicamente três formantes para a voz dos adultos. Assim num «vocoder» de formantes o analizador procura detectar as frequências das formantes principais, assim como as suas amplitudes as quais são utilizadas para controlar, respectivamente, filtros variáveis e moduladores do sintetisador. A excitação do sintetisador é feita do mesmo modo que no «spectrum channel vocoder». Um esquema exemplificativo do «vocoder» de formantes com sintetisador paralelo é mostrado na figura 8.2.

Um modelo ainda mais económico, no que respeita à transmissão das formantes é o chamado «Pattern-Matching Vocoder». Num dado instante, é determinada a melhor semelhança entre o «short-time» spectrum e um

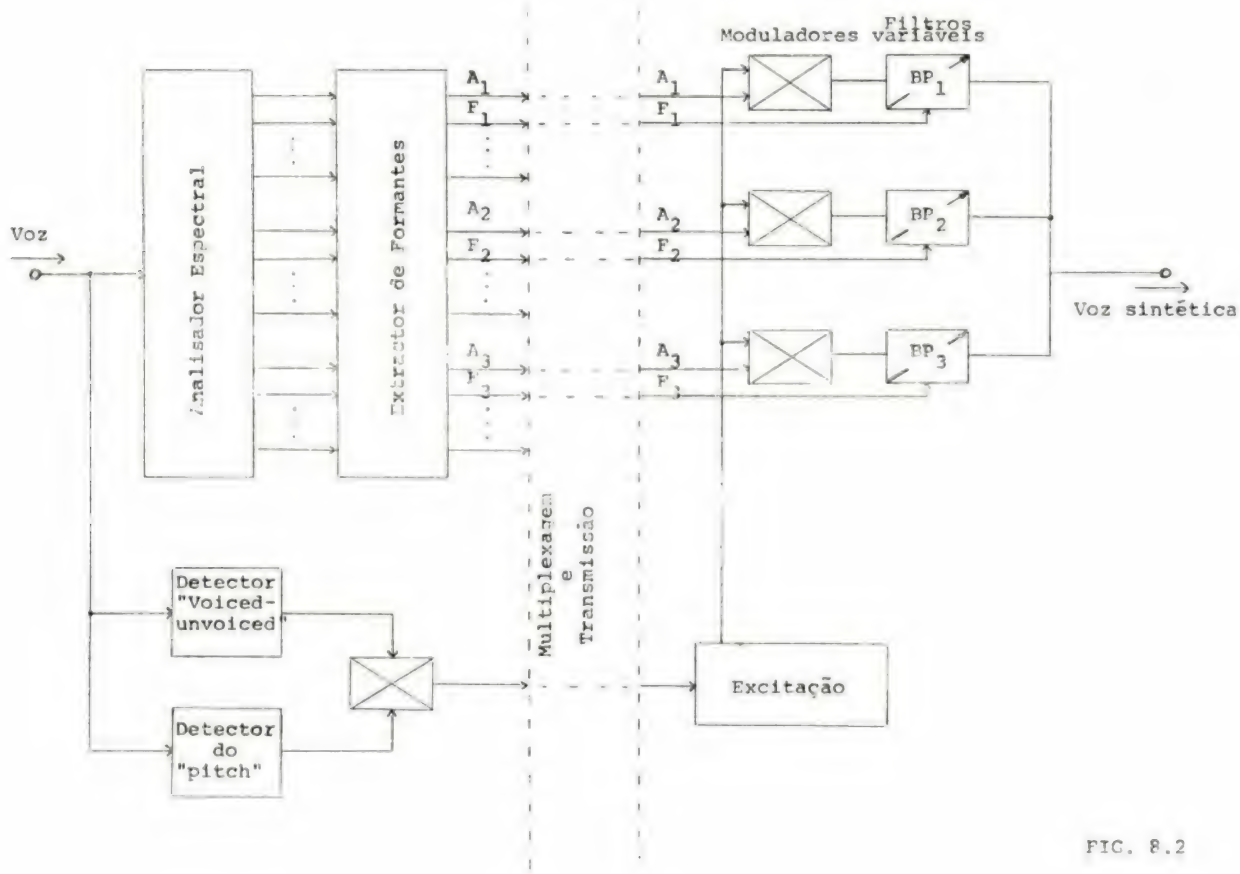



FIG. 8.2

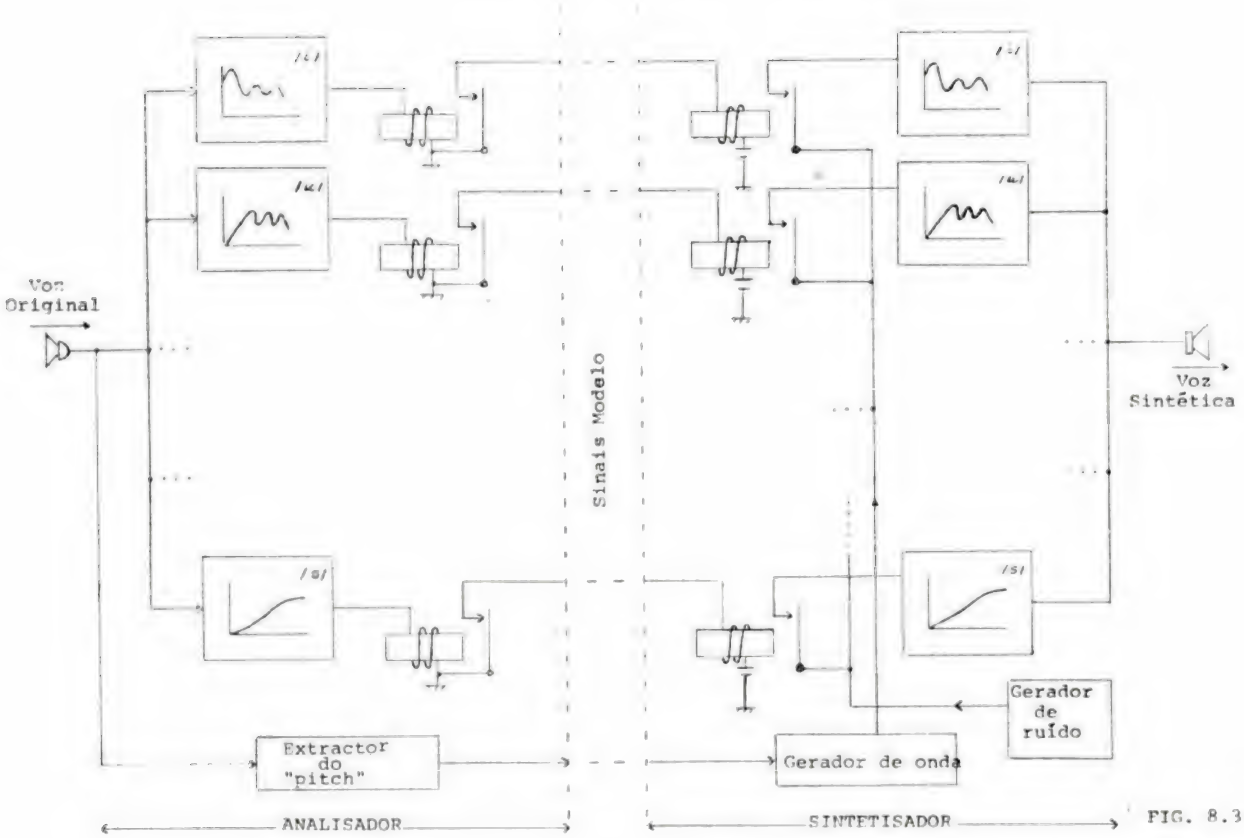

Voz Original
Sinais Modelo
Voz Sintética
Gerador de ruído
Extractor do "pitch"
Gerador de onda
ANALISADOR
SINTETISADOR

FIG. 8.3

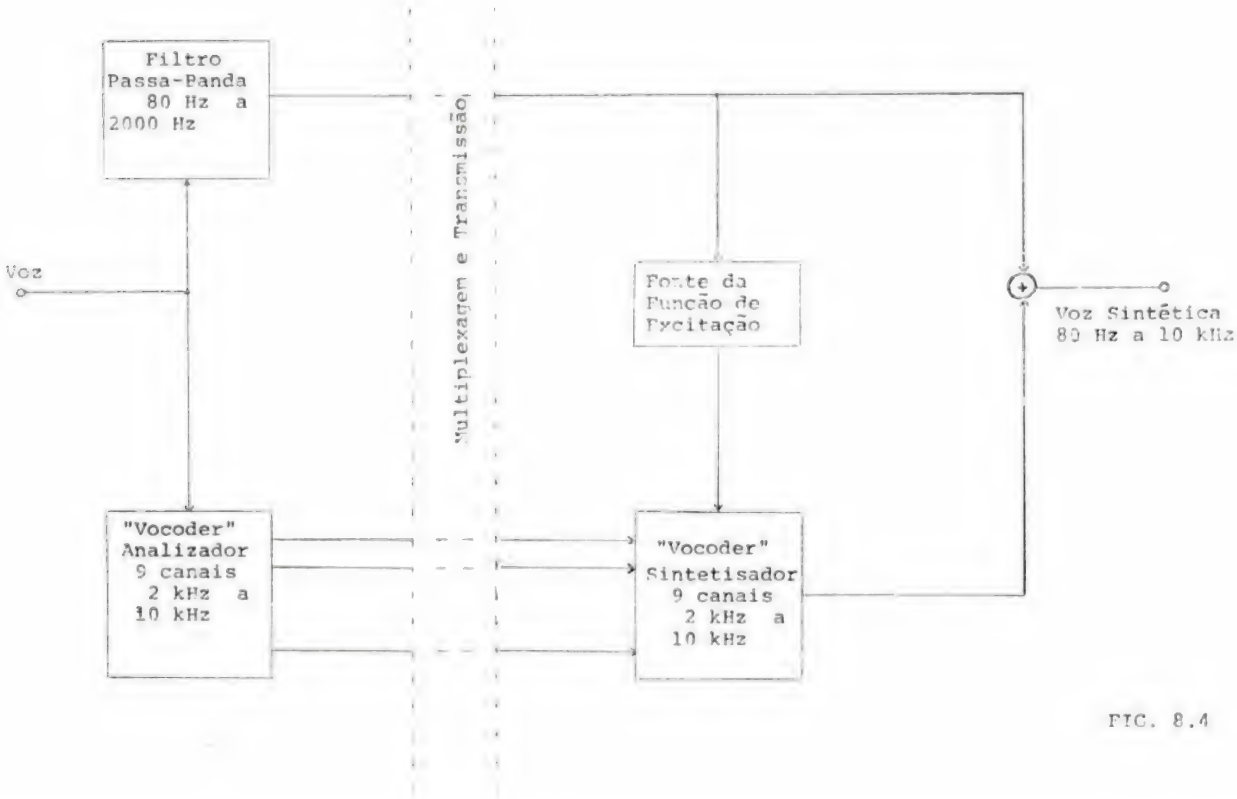

Filtro Passa-Banda 80 Hz a 2000 Hz
Voz
Multiplexagem e Transmissão
Fonte da Função de Excitação
Voz Sintética 80 Hz a 10 kHz
"Vocoder" Analizador 9 canais 2 kHz a 10 kHz
"Vocoder" Sintetisador 9 canais 2 kHz a 10 kHz

FIG. 8.4

número fixo de modelos espectrais armazenados, no que diz respeito às formantes. Um código representando a melhor semelhança é transmitido para o sintetisador, activando o espectro seleccionado, o qual irá modular o sinal excitador.

Esquematicamente temos representado um «Pattern-Matching Vocoder» na figura 8.3.

Filtros são incluídos para fazer uma transição suave de um som modelo para outro.

Temos ainda o «vocoder» de correlação que se baseia, como o nome indica, na determinação da autocorrelação do sinal falado e os «vocoders» de Alta Fidelidade de que é exemplo o «Voice-excided vocoder».

Este último tem como função transmitir sinais falados de alta qualidade com uma banda de 10 kHz sobre uma banda de 3 kHz.

Do que se disse atrás em relação ao ouvido percebe-se facilmente que o grande problema nos «vocoders» se põe no sintetisador com a função de excitação, ou seja, com o correcto conhecimento do «pitch». Por isso, no

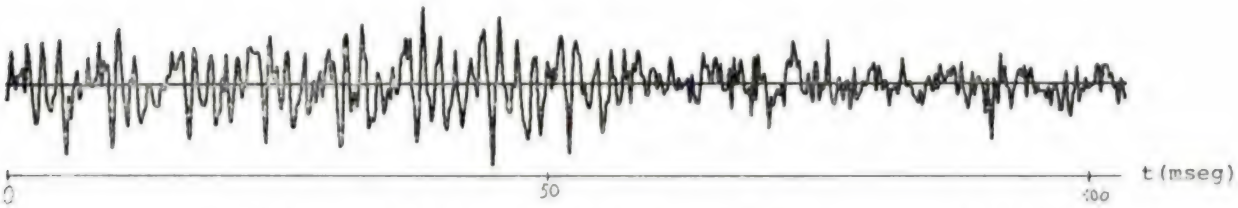



Fig. 9.1 — Sinal da fig. 3.3 imerso em ruído branco. Relação sinal-ruído: 3,4 dB

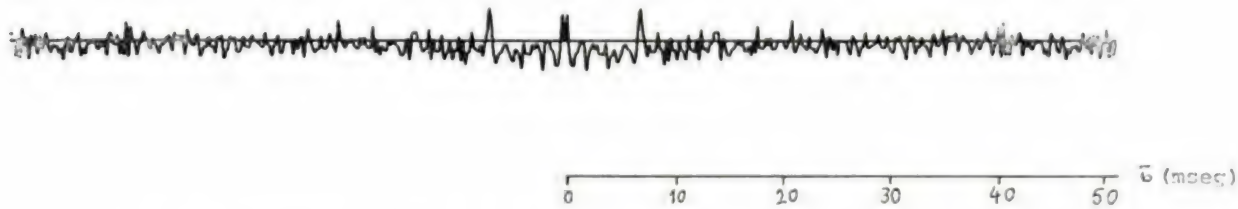



Fig. 9.2 — «Cepstrum» do sinal da fig. 9. Pico: $\tau$ = 7,0 mseg. (Pico da origem multiplicado por zero)

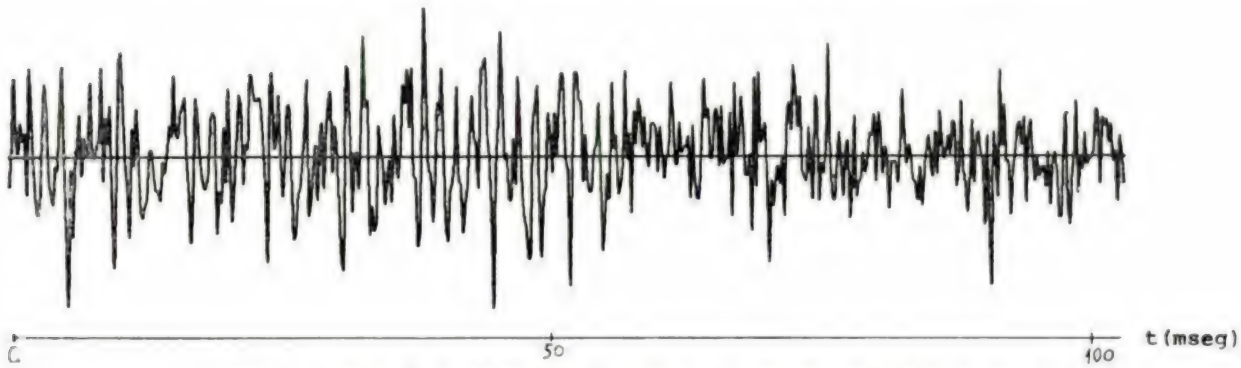



Fig. 9.3 — Sinal da fig. 3.3 imerso em ruído branco. Relação Sinal-Ruído: 0 dB

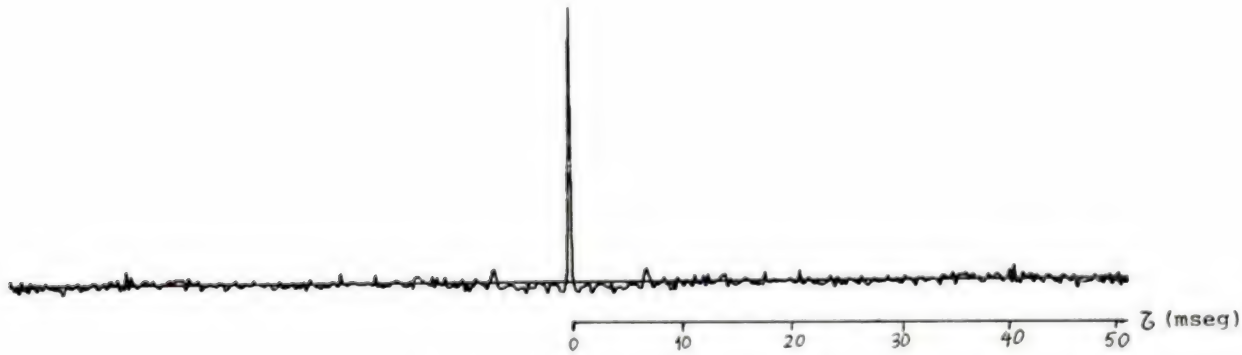



Fig. 9.4 — «Cepstrum» do sinal da fig 9.3

«voiced-excided vocoder», da banda de 10 kHz iniciais, uma banda baixa de 2 kHz é enviada directamente, tendo no sintetisador duas funções de excitação, ou seja, de fornecer o «pitch» o mais correctamente possível, como se pode ver na figura 8.4

Como acabamos de ver, é fundamental a separação da envolvente da estrutura fina, ou seja, a separação das formantes do «pitch».

Até à data foi o «cepstrum» o método que melhores resultados forneceu nesta divisão e na sua determinação.

## 9 — RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO «CEPSTRUM» CONSOANTE A RELAÇÃO SINAL RUÍDO

Vamos agora ver que para sinais imersos em ruído de modo que a relação sinal-ruído tenha pequenos valores a técnica de «cepstrum» deixa de fornecer resultados satisfatórios, apresentando um exemplo.

Na figura 9.1 está representado o sinal da figura 3.3 imerso em ruído branco, sendo a relação sinal-ruído 3,4 dB. Na figura 9.2 está representado o respectivo «cepstrum» e como se vê para esta relação sinal-ruído ainda é bem nítido o pico para $\tau = 7{,}0$ mseg, correspondente ao «pitch», como se viu no parágrafo 3.

Na figura 9.3, por sua vez, está representado o mesmo sinal imerso em ruído branco, mas desta vez a relação sinal-ruído é de 0 dB. Para este caso ainda está presente o pico correspondente a $\tau = 7{,}0$ mseg, mas a sua amplitude é comparável à de outros picos presentes (por exemplo, em torno de $\tau = 20$ e $\tau = 40$ mseg). Sem o conhecimento que tínhamos «a priori» de qual o valor «pitch», não poderíamos decidir qual dos picos corresponderia a esse «pitch».

Para relações sinal-ruído ainda menores, o pico pode estar totalmente camuflado nas irregularidades do «cepstrum».

## 10 — REFERÊNCIA A OUTROS MÉTODOS DE DETECÇÃO DO «PITCH» E FORMANTES.

Dado que o «cepstrum» não fornece resultados satisfatórios para os casos de sinais imersos em ruído com uma pequena relação sinal-ruído e ainda para um certo número de outros casos como, por exemplo, os referidos no parágrafo 3, foram desenvolvidos outros métodos de detecção do «pitch», que não estudaremos, porque o nosso objectivo era o de estudar as possibilidades da técnica de «cepstrum», mas aque desejamos fazer referência para um conhecimento mais exacto dessas mesmas possibilidades e para uma possível continuação dos nossos etudos sobre os sinais falados.

M. Noll desenvolveu três métodos que permitem obter resultados para aqueles casos que referimos e para os quais o «cepstrum» não satisfaz. São eles a determinação do Espectro Produto das Harmónicas, do Espectro Soma das Harmónicas e a estimação da Máxima Veroesimilhança estudados no seu trabalho que referimos com o número [4].

## BIBLIOGRAFIA


[1] A. Michael Noll, «Cepstrum Pitch Determination» in The Journal of The Acoustical Society of America, vol. 41,number 2 - 1967, pags. 293 - 309.

[2] M. R. Schroeder, «Vocoders Analysis and Synthesis of Speech» in Proceedings of the I. E. E. E., vol. 54, No. 5, May 1966, pags 720 - 734.

[3] J. L. Flanagan, «Speech Analysis Synthesis and Perception», Springer — Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York.

[4] A. Michael Noll, «Pitch Determination of Human Speech by the Harmonic Product Spectrum, Harmonic Sum Spectrum and a Maximum Likeliwood Estimate» in Communications Polytechnic Institute of Brooklyn, April 8 - 10, 1969 pags 779 - 797.

[5] B. P. Bogert; M. J. Healy e J. W. Tukey, «The Quefrency Alanysis of Time Series for Echoes; Cepstrum, Pseudo — Autocovariance, Cross-Cepstrum and Saphe Cracking» in Proc. Symp. Time Series Analysis, M. Rosenblat, Ed., New-York Wiley, 1963, cap. 15, pags. 209 - 243.

[6] B. Almeida; S. Arroz; «Estudo Experimental da Aplicação do Cepstro. Detecção de Ecos e Periodicidades em Sinais», Centro de Estudos de Electrónica, Relatório de Estágio, I. S. T.

[7] R. B. Blachman and J. W. Tukey, «The Measurement of Power Spectrum» Dover Publication, Inc., New-York, 1959.

[8] R. C. Kemerait and D. G. Childers, «Signal Detection and Extraction by Cepstrum Techniques», in I. E. E. E. Transactions on Information Theory, vol. IT-18, no. 6, November 1972, pags 745 - 759.

[9] A. Michael Noll,«Short-time Spectrum and «Cepstrum» Technique for Vocal-Pitch Detection» in The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 36, Nov. 1964, pags. 296 - 302.

# electrobombas

## TIPO CM

- Tipo Monobloco
- Flanges na admissão e na saída
- Caudais até 70.000 litros/hora
- Elevado rendimento
- Serviço contínuo
- Alturas manométricas até 42 m.
- Motor eléctrico e Bomba de fabricação EFACEC
- Peças legítimas

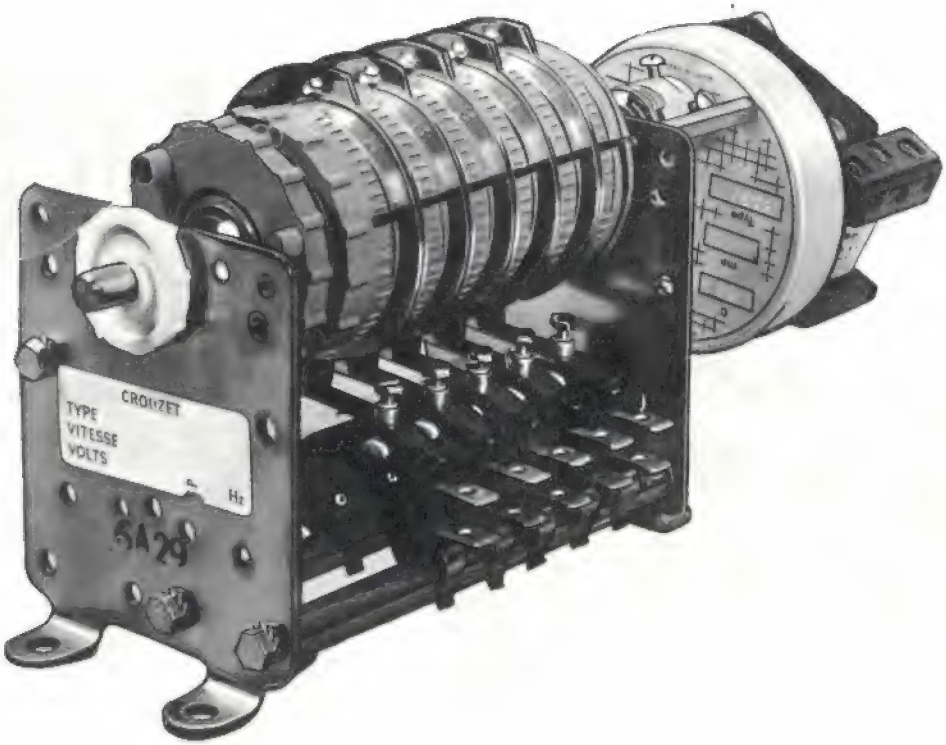
EFACEC

EFACEC

**EFACEC,** Empresa Fabril de Máquinas Eléctricas, S. A. R. L.

Divisões comerciais: **LISBOA** – RUA RODRIGO DA FONSECA, 76, 3.º – TELEF. 53 01 61

**PORTO** – RUA SÁ DA BANDEIRA, 706, 5.º – TELEFONE 31 20 14





# AUTOMATISMO

CROUZET

**TEMPORIZADORES**
**PROGRAMADORES**
**CONTROLADORES DE HORAS**
**CONTROLADORES DE SEGUNDOS**
**MICROMOTORES**
**MICROINTERRUPTORES**
**CELULASFOTOELECTRICAS**
**COMBINADORES**

*ELECTROTÉCNICOS REUNIDOS Lda.*
*av. duque de ávila, 66-3º lisboa portugal*

NÚMERO 428 JULHO DE 1975 ANO L VOLUME XXXVII

C. D. U. 517.5(084):681.14

# Um programa para o traçado de curvas de nível em pequenos calculadores

J. J. AMARANTE DOS SANTOS

SUMÁRIO

*Indica-se um algoritmo para o traçado automático de isolinhas de funções cujos valores são conhecidos nos nós de uma malha rectangular. Embora já existam bastantes trabalhos sobre este problema implementados em grandes instalações, o autor desconhece outras versões que sejam facilmente aplicáveis a pequenos calculadores.*

*Apresenta-se a listagem do programa em BASIC para um calculador Hewlett-Packard 9830. Existe no NEEM (IST) uma versão para o Hewlett-Packard 9820A-001.*

ABSTRACT

*An algorithm for contour drawing of functions whose values are known at grid points of a rectangular mesh is presented. There are many implementations for problems of this kind for great computers but no versions for mini-calculators are known to the author.*

*A program listing written in BASIC for a Hewlett-Packard 9830 Calculator is presented. Another version for the Hewlett-Packard 9820A-001 is available at the NEEM (IST).*

## INTRODUÇÃO

Este programa surgiu da necessidade de traçar automaticamente as curvas de nível de uma função cujos valores fossem conhecidos nos nós de uma malha rectangular.

Foi escrito numa linguagem específica do Calculador 9820A da Hewlett-Packard e supõe instalada a opção 001 (429 registos de memória) e a existência de um «9862A Calculator Plotter Hewlett-Packard» acoplado ao Calculador.

Posteriormente foi feita uma tradução do programa para BASIC pelo aluno bolseiro José Francisco Oliveira Santos.

O programa foi realizado e afinado no Núcleo de Estudos de Engenharia Mecânica.

## DESCRIÇÃO DO ALGORITMO

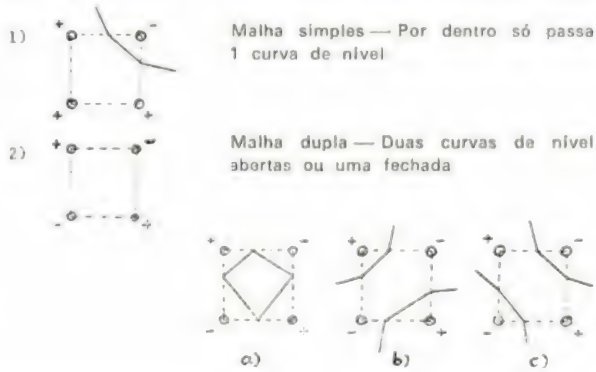
O método utilizado consiste em definir no domínio da função a estudar um reticulado, dando o valor da função nos nós da malha estabelecida.

O programa permite traçar curvas de nível que se fecham dentro do domínio e curvas de nível que começam numa fronteira e acabam noutra (ou nessa) fronteira.

Os nós dividir-se-ão em duas categorias:

1) Nós em que a função tem um valor superior ao da curva (+);
2) Nós em que a função tem um valor inferior ao da curva (−).

As malhas dividir-se-ão também em dois tipos:



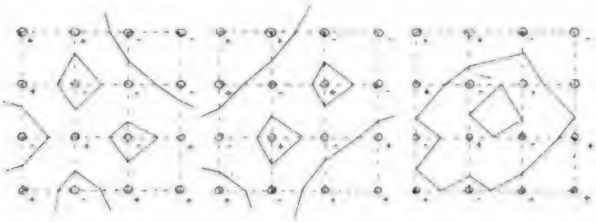

Malha simples — Por dentro só passa 1 curva de nível

Malha dupla — Duas curvas de nível abertas ou uma fechada

CRITÉRIOS

O traçado das curvas de nível processa-se fazendo interpolações lineares entre nós consecutivos. Usam-se interpolações lineares porque se pensa que se o n.º de pontos for insuficiente, ao fazermos interpolações mais sofisticadas estamos a introduzir informação que nos possibilitará o traçado duma curva que pode nada ter a ver com a função em estudo em virtude da informação introduzida ser em grande parte arbitrária.

O facto de num determinado caso aparecerem muitas malhas do tipo 2) quer precisamente dizer que não se possui suficiente informação sobre a função para se tratar a curva com segurança. A título de exemplo apresentam-se para uma mesma distribuição de nós as curvas que se obtêm utilizando o critério a), o critério b), ou o critério c).



critério a) critério b) critério c)

É bem patente neste exemplo que a informação que se dispõe sobre a função é insuficiente e que qualquer dos critérios corresponde a uma hipótese tão plausível como as outras, sendo talvez o critério a) que apresenta maior arbitrariedade, pois entre duas curvas de nível, em que uma está contida na outra, apresenta pontos em que a função toma valores acima e abaixo do valor que tem na curva. Os critérios b) e c) são perfeitamente equivalentes.

Como norma geral, poder-se-á portanto dizer que quando a percentagem de malhas de tipo 2) for elevada, o gráfico não tem grande significado, tornando-se necessário um refinamento da malha.

Para que o programa não ficasse muito complicado era necessário no entanto escolher um critério, que foi o b). Não é muito difícil alterar o programa para este seguir o critério c).

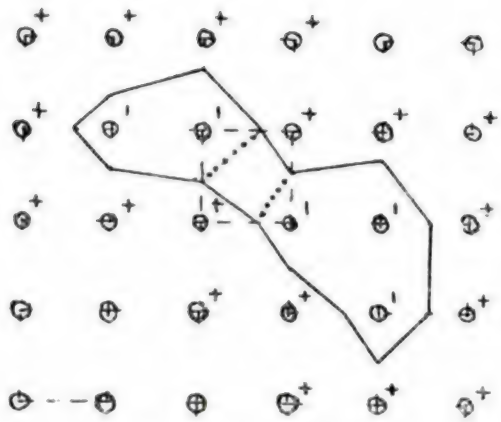
Quando as curvas correspondentes ao nível desejado estão bem definidas mas passam ambas por uma mesma malha, o critério b) dá uma só curva caso se tratem de duas depressões, enquanto que se forem duas elevações dará duas curvas. Com o critério c) passa-se o contrário.

DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

1.1. — GENERALIDADES

Quando o programa se inicia os valores da função nos nós da malha devem já estar metidos nos registos correspondentes.

Por cada segmento que une dois nós consecutivos não pode passar mais do que uma curva de nível visto a interpolação ser linear.



TRAÇO CHEIO — CRITÉRIO b)
» PONTEADO — » c)

Vê-se neste exemplo que a única zona mal definida é a que corresponde à malha do tipo 2).

A cada segmento que une dois nós consecutivos da malha corresponde um determinado bit que se pode encontrar no estado de «aceso» ou de «apagado».

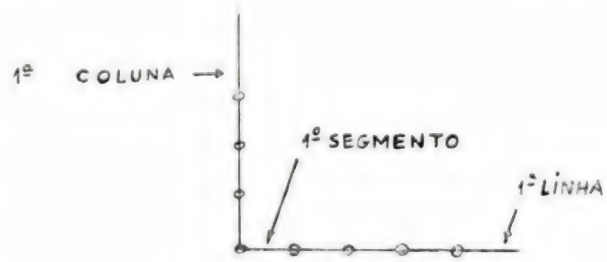
Quando o programa se inicia, todos os bits se devem encontrar no estado de «apagado».

À medida que o programa vai correndo, quando uma curva de nível intersecta um determinado segmento, o bit que corresponde a esse segmento é posto no estado de «aceso». Este processo destina-se a evitar que uma mesma curva de nível seja traçada duas ou mais vezes.

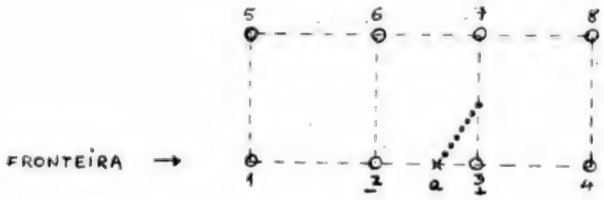
A lógica do programa pressupõe que os pontos da curva de nível a traçar se encontram sempre sobre segmentos unindo nós consecutivos. Numa terceira versão do programa terá que ser previsto um ciclo inicial em que se houver algum nó em que o valor da função seja igual ao da cota da curva se adicione àquele uma quantidade insignificante para o traçado da curva mas que evite possíveis descontroles (por exemplo $10^{-3}$ x valor da função no nó).

1.2. — VARRIMENTO DAS FRONTEIRAS

Partindo portanto do pressuposto que os pontos da curva assentam sempre sobre segmentos, o programa começa por verificar se existe algum ponto duma curva de nível de cota dada no início do programa, no 1.º segmento da 1.ª linha da malha. Se não existir, passa ao 2.º segmento e assim sucessivamente até esgotar a 1.ª linha. Se nesta fronteira não houver nenhum ponto o programa vai pesquisar nas outras fronteiras do domínio.



Quando é descoberto um ponto da curva numa fronteira é aceso o bit correspondente a esse segmento e inicia-se o traçado duma curva de nível cuja evolução se passa a descrever.




Supondo que o ponto detectado se situava no segmento (2-3) o programa iria em 1.° lugar testar o segmento (3-7) para ver se passava por lá alguma curva de nível; Em caso afirmativo uniria o ponto a com o ponto do segmento (3-7), seguindo assim o critério b) no caso da malha ser dupla. Caso não existisse nenhum ponto com a cota dada no segmento (3-7) iria pesquisar no segmento (2-6) e depois em (6-7). A ordem de pesquisa de (2-6) e (6-7) é irrelevante para o traçado da curva: o que realmente interessa para a execução do critério b) é que se 3 for um ponto (+) o 1.° segmento a pesquisar seja (3-7).

Dada a sequência como a pesquisa é feita mal o programa detecte um ponto num daqueles 3 segmentos, une-o logo com o ponto a. Se por exemplo existisse um ponto em (3-7), depons do traçado do 1.° segmento de recta da curva de nível o programa iria pesquisar a existência de pontos em (3-4), (7-8) e finalmente (4-8), repetindo-se este processo até que a curva de nível intersectasse um outro segmento de recta pertencendo a uma fronteira.

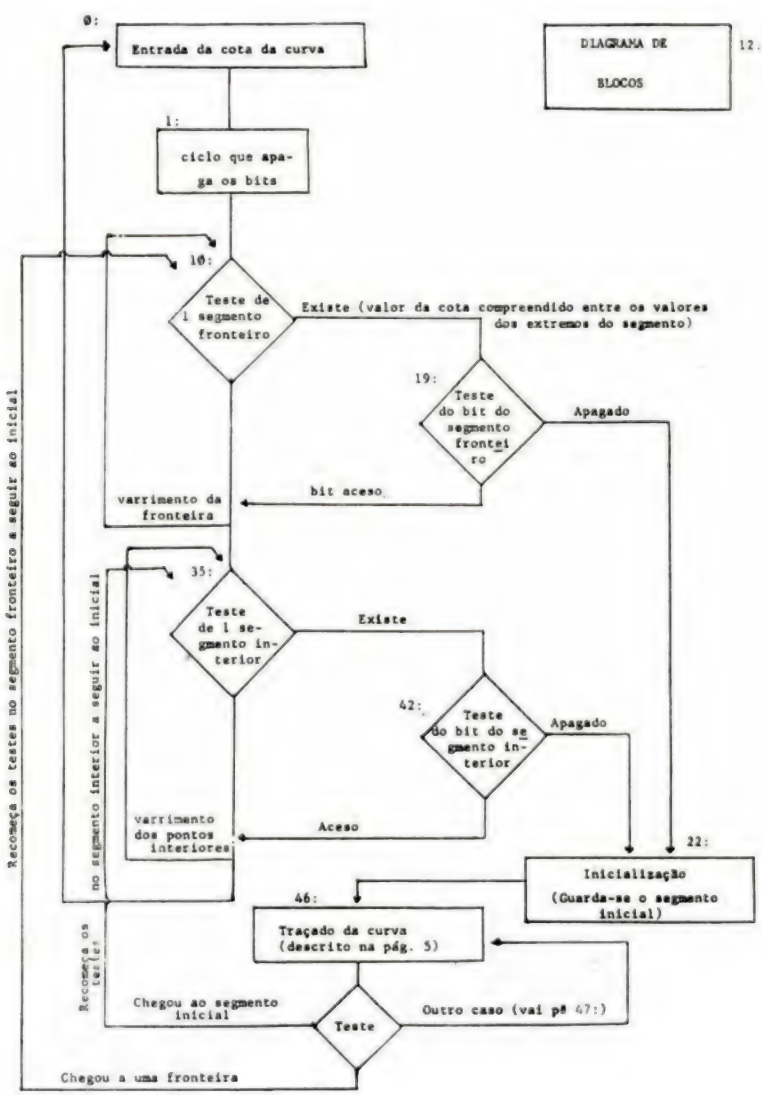
Ao longo do traçado da curva o programa vai acendendo os bits correspondentes aos «segmentos de recta unindo nós consecutivos» que a curva vai intersectando.

Quando a curva chega a uma fronteira a pena é levantada e recomeça a pesquisa de pontos ao longo das fronteiras no segmento imediatamente a seguir àquele em que tinha começado o traçado da curva. Será oportuno acrescentar, que em virtude do programa testar o estado do bit correspondente a um segmento em que se detectou um ponto da curva, quando o programa passar pelo segmento em que terminou a 1.ª curva de nível traçada, o traçado desta já não será repetido.

Nota: em virtude do segmento em que começa uma curva de nível já não voltar a ser testado, é irrelevante acender o bit que lhe corresponde.

## 1.3. — VARRIMENTO DOS PONTOS INTERIORES

Para detectar curvas de nível fechadas são varridos os segmentos interiores Só é necessário varrer um



tipo de segmentos (horizontais ou verticais).

Quando num segmento interior (segmento que não pertence a uma fronteira) é detectado um ponto duma curva começa-se o traçado da mesma maneira que para as curvas começando numa fronteira.

O traçado da curva pára quando se passa pela 2.ª vez pelo segmento inicial.

Como o processo de «acender bits» não permite que se «acenda» o mesmo bit duas vezes, quando se inicia o traçado de uma curva fechada não se acende o bit do segmento inicial, vindo aquele a ser aceso quando se fecha a curva.

Depois do varrimento dos pontos interiores é pedido outro valor para a cota.

Nota: O programa não permite que haja mais do que 1296 nós (o que corresponde a 36 × 36) mas isso não constitui verdadeiramente uma limitação pois pode-se sempre dividir o domínio da função em vários sub-domínios.

## TESTE EFECTUADO

Na figura abaixo reproduzem-se as curvas obtidas para uma função f (x, y) que era nula em todos os nós excepto nos definidos pelas coordenadas:

(2,1), (3,1); (2,3); (3,4); (5,3), (5,4), (6,3), (6,4); (1,5), (1,6); (3,6), (4,6), (4,7); (8,y = 1,11)

em que tinha o valor 5.

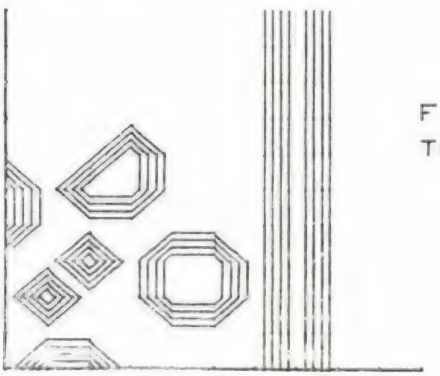


FIGURA DO TESTE

As curvas traçadas correspondem às cotas 4, 3, 2 e 1.

O tempo para traçar cada uma das curvas foi de aproximadamente 1 minuto e 10 segundos. Este tempo que parece um pouco excessivo deve-se em grande parte à existência de muitas curvas em virtude do exemplo ser um teste. Numa função melhor definida do que esta existirá para cada cota muito menos curvas.

Esse facto reduzirá o tempo pois para o programa se aperceber da inexistência de curvas de cota 6 demorou apenas 24 segundos.

## LISTAGEM DO PROGRAMA

```
 10 DIM R [250], FS [36,36]
 20 I9 = 0
 30 DISP «NUM. DE PONTOS SEGUNDO OX, OY»;
 40 INPUT X1, X2
 50 GOSUB 2270
 60 R9 = SQR( (X1 + 1)*X2 — 2)
 70 IF R9 = INT (R9) THEN 90
 80 R9 = INT (R9) + 1
 90 R8 = 12 + 2*R9
100 A1 = FNI (O)
110 DISP «COTA»;
120 INPUT RO
130 FOR Y = 1 TO X2
140 FOR X = 1 TO X1
150 IF RO . F [X, Y] THEN 170
160 F[X, Y] = 1.0001*F [X, Y]
170 NEXT X
180 NEXT Y
190 A = 12
200 R [12 + R9] = 1
210 A = A + 1
220 R [A] = 0
230 R [A +R9] = 2*R [A + R9 - 1]
240 IF A <= 11 + R9 THEN 210
250 I8 = 0
260 Y = 1
270 X = 1
280 B = X + 1 - I8
290 C = Y + I8
300 GOSUB 1960
310 IF I5 = 1 THEN 460
320 IF (Y = 1) AND (X = X1 - 1) THEN 390
330 IF (Y = X2) AND (X = X1 -1) THEN 410
340 IF (X = 1) AND (Y = X2 - 1) THEN 430
350 IF (X = X1) AND (Y = X2 - 1) THEN 630
360 X = B
370 Y = C
380 GOTO 280
390 Y = X2
400 GOTO 270
410 I8 = 1
420 GOTO 260
430 X =X1
440 Y = 1
450 GOTO 280
460 I7 = 1
470 GOSUB 2020
480 IF I7 = 1 THEN 320
490 R4 = X
500 R6 = B
510 R5 = Y
520 R7 = C
530 IF I8 = 1 THEN 590
540 I3 = 0
550 IF (Y = 1) AND (I8 = 0) THEN 570
560 IF ( (Y = X2) AND (I8 = 0) ) OR ( (X = 1) AND
    (I8 = 1) ) THEN 610
570 I4 = 0
580 GOTO 830
590 I3 = 1
600 GOTO 550
```

# Synopsis of articles published in «Técnica» n.° 428

## L — Julle 1975

C. D. U. 621.3:517.512.2

IRIARTE JOSÉ ARAÚJO ESTEVES
e
JOSÉ ALBERTO TEIXEIRA

### «CEPSTRUM» APLICATION TO SPEECH ANALYSIS «VOCODERS»

This paper, reprinted from a technical report of Laboratório de Análise de Sonais, I. A. C., starts with a short description of speech signals and a brief theoretical analysis of cepstrum. These techniques are then applied to the determination of speech parameters. The paper ende with an introduction to vocoders.

U. D. C. 624.131.388:627.82

J. LAGINHA SERAFIM
e
MARCIANO L. GUERREIRO

### TESTS AND OBSERVED BEHAVIOUR OF ROCK FOUNDATIONS OF DAMS

The paper presents results of many year's efforts to interpret deformability tests of foundation rocks of concrete dams. Results of «in situ» deformability tests depend on the direction, depth of tests and thegeological details of the site. Correlations with depth and dip and strike of the formations are very clear. Methods of interpretation used and comparisons with laboratory results are discussed and results of many tests at site in various rocks are presented. New findings on the effects of grouting in deformability are indicated and the most recent information is given on rocks foundation behaviour, based on observation with long length strain meters (extensometers).

U. D. C. 517.(084):681.14

J. J. AMARANTE DOS SANTOS

### A PROGRAM FOR CONTOUR DRAWING IN MINI-CALCULATORS

An algorithm for contour drawing of functions whose values are known at grid points of a rectangular mesh is presented. There are many implementations for problems of this kind for great computers but no versions for mini-calculators are known to the author.
A program listing written in BASIC for a Hewlett-Packard 9830 Calculator is presented. Another version for the Hewlett-Packard 9820A-001 is available at the NEEM (IST).

U. D. C. 628.5:551.510.4

J. J. DELGADO DOMINGOS
e
M. TERESA PONTES

### AN AIR POLLUTION GAUSSIAN DIFFUSION MODEL

This report presents a Gaussian dispersion model for gaseous pollutants which accounts for the effects of multiple ponctual sources, temperature inversion, atmospheric stability and variations in both wind speed and direction.
The stability of the atmosphere is classified into Pasquill's classes and the standard deviations of the concentration ($\sigma y$, $\sigma z$) are calculated by means of a numerical approximation to Pasquill-Gifford's plots.
A few examples ilustrating the effect of atmospheric stability and of inversion on ground level concentration and of the interference of nearby sources are also worked out.

# Resumo dos Artigos publicados na «Técnica» n.º 428

## Ano L — Julho 1975

C. D. U. 624.131.388:627.82

J. LAGINHA SERAFIM
e
MARCIANO L. GUERREIRO

### ENSAIOS DE FUNDAÇÕES ROCHOSAS DE BARRAGENS E SEU COMPORTAMENTO

Este trabalho apresenta os resultados dos esforços de vários anos para interpretar ensaios de deformabilidade de fundações rochosas de barragens de betão. Os resultados de ensaios de deformabilidade «in situ» dependem da direcção e profundidade dos pontos ensaiados e das condições geológicas, sendo muito claras as correlações com a profundidade e inclinação das formações. São discutidos os métodos de interpretação usados e feitas comparações com resultados obtidos em laboratório, sendo apresentados os resultados de diversos ensaios «in situ» em diferentes rochas. Indicam-se novos factos sobre os efeitos da injecção na deformidade agora encontrados e dão-se informações recentes sobre o comportamento das fundações em rocha, baseadas em observações com medidores de extensões de grande comprimento (extensometros)

C. D. U. 621.3:517.512.2

IRIARTE JOSÉ ARAÚJO ESTEVES
e
JOSÉ ALBERTO TEIXEIRA

### «CEPSTRUM» ESTUDO EXPERIMENTAL DA SUA APLICAÇÃO AO SINAL FALADO. «VOCODERS»

Este trabalho, que constitui relatório de um estágio realizado no Laboratório de Análise de Sinais do I. A. C., é iniciado com uma análise resumida do sinal falado e um breve estudo teórico da técnica do cepstrum. Seguidamente é apresentada a aplicação desta técnica na determinação de alguns parâmetros de sinais daquele tipo. Por úúltimo, faz-se uma introdução ao estudo dos vocoders.

C. D. U. 628.5:551.510.4

J. J. DELGADO DOMINGOS
e
M. TERESA PONTES

### UM MODELO GAUSSIANO PARA A DISPERSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA

Apresenta-se um modelo Gaussiano de dispersão de poluentes na atmosfera, considerando o efeito de fontes múltiplas pontuais, a existência de inversão de temperatura em altitude, a variabilidade da direcção e velocidade do vento e da estabilidade da atmosfera.
A estabilidade da atmosfera é classificada segundo o método de Pasquill sendo o desvio padrão da concentração de poluentes calculado a partir de aproximações numéricas de gráficos de Pasquill-Gifford.
No final são apresentados alguns exemplos que ilustram o efeito da variação da estabilidade da atmosfera, da existência de inversão e a interferência de fontes próximas.

C. D. U. 517.5(084):681.14

J. J. AMARANTE DOS SANTOS

### UM PROGRAMA PARA O TRAÇADO DE CURVAS DE NÍVEL EM PEQUENOS CALCULADORES

Indica-se um algoritmo para o traçado automático de isolinhas de funções cujos valores são conhecidos nos nós de uma malha rectangular. Embora já existam bastantes trabalhos sobre este problema implementados em grandes instalações, o autor desconhece outras versões que sejam facilmente aplicáveis a pequenos calculadores.
Apresenta-se a listagem do programa em BASIC para um calculador Hewlett-Packard 9830. Existe no NEEM (IST) uma versão para o Hewlett-Packard 9820A-001.

```
1800 I4 = 1
1810 RETURN
1820 END
1830 R3 = (RO - F [X, Y]) / (F [B, C]
-F[X, Y])
1840 IF I9 = 0 THEN 1900
1850 IF X = B THEN 1930
1860 B = X + R3* (B - X)
1870 PLOT B,C
1880 I9 = 0
1890 RETURN
1900 I7 = 0
1910 GOSUB 2020
1920 GOTO 1850
1930 C = Y + R3* (C - Y)
1940 GOTO 1870
1950 END
1960 I5 = 0
1970 IF (F [X,Y] - RO)* (F [B,C] - RO) <= 0
     THEN 1990
1980 RETURN
1990 I5 = 1
2000 RETURN
2010 END
2020 IF B # X THEN 2200
2030 IF (X # 1) AND (X # X1) THEN 2250
2040 SO = (X1 - 1)* X2 + INT ( (C + Y)/2)
2050 IF X # X1 THEN 2070
2060 SO = SO + X2 - 1
2070 S1 = INT (SO/R9)
2080 SO = SO - S1*R9
2090 IF SO = 0 THEN 2220
2100 S1 = 13 + S1
2110 IF I7 = 1 THEN 2140
2120 R [S1] = R [S1] + R [12 + R9 + SO]
2130 RETURN
2140 S2 = R [S1]
2150 S2 = S2/R [12 + R9 + SO]
2160 Z = INT (S2)/2
2170 IF Z # INT (Z) THEN 2250
2180 I7 = 0
2190 RETURN
2200 SO = (X1 - 1) * (Y - 1) + INT ( (X + B)/2)
2210 GOTO 2070
2220 SO = R9
2230 S1 = S1 - 1
2240 GOTO 2100
2250 RETURN
2260 END
2270 SCALE 1, X1, 1, X2
2280 DISP «QUER EIXOS? SIM>   ; NÃO>0»;
2290 INPUT L1
2300 IF L1 = 0 THEN 2350
2310 XAXIS 1, 1
2320 YAXIS 1, 1
2330 XAXIS X2, 1
2340 YAXIS X1, 1
2350 RETURN
2360 END
2370 DEF FNI (Z)
2380 FOR X = 1 TO 11
2390 FOR Y = 1 TO 11
2400 F [X, Y] = 0
2410 NEXT Y
2420 NEXT X
2430 F[2,1] = F[3,1] = F [2,3] = F[3,4] = F
[5,3] = F[5,4] = F [6,3] = 5
2440 F[6,4] = F[1,5] = F [1,6] = F[3,6] = F
[4,6] = F[4,7] = 5
2450 FOR Y = 1 TO 11
2460 F [8,Y] = 5
2470 NEXT Y
2480 RETURN O
2490 END
```

```
610 I4 = 1
620 GOTO 830
630 I8 = 0
640 Y = 2
650 X = 1
660 B = X + 1
670 C = Y
680 GOSUB 1960
690 IF I5 = 1 THEN 780
700 IF X = X1 - 1 THEN 760
710 X = 1
720 IF Y <= X2 - 2 THEN 740
730 GOTO 110
740 Y = Y + 1
750 GOTO 660
760 X = B
770 GOTO 660
780 I7 = 1
790 GOSUB 2020
800 IF I7 = 1 THEN 700
810 I9 = 1
820 GOTO 490
830 GOSUB 1830
840 A = (- 1)  I4
850 IF I3 = 1 THEN 1010
860 C = Y + A
870 IF F [X, Y] > F [X + 1,Y] THEN 930
880 GOSUB 1300
890 IF I5 = 1 THEN 1150
900 GOSUB 1450
910 IF I5 = 1 THEN 150
920 GOTO 970
930 GOSUB 1450
940 IF I5 = 1 THEN 1150
950 GOSUB 1300
960 IF I5 = 1 THEN 1150
970 Y = C
980 B = X + 1
990 GOSUB 1830
1000 GOTO 1150
1010 B = X - A
1020 IF F [X, Y] > F [X, Y + 1] THEN 1080
1030 GOSUB 1570
1040 IF I5 = 1 THEN 1150
1050 GOSUB 1710
1060 IF I5 = 1 THEN 1150
1070 GOTO 1120
1080 GOSUB 1710
1090 IF I5 = 1 THEN 1150
1100 GOSUB 570
1110 IF I5 = 1 THEN 1150
1120 C = Y + 1
1130 X = B
1140 GOSUB 1830
1150 IF (X = R4) AND (Y = R5) AND (I3 = I8) THEN
     1190
1160 IF ( (X = 1) OR (X = X1) ) AND (I3 = 1) THEN
     1230
1170 IF ( (Y = 1) OR (Y = X2) ) AND (I3 = 0) THEN
     1230
1180 GOTO 840
1190 B = R6
1200 C = R7
1210 PEN
1220 GOTO 700
1230 B = R6
1240 C = R7
1250 X = R4
1260 Y = R5
1270 PEN
1280 GOTO 320
1290 END
1300 X = X + 1
1310 B = X
1320 GOSUB 1960
1330 IF I5 = 1 THEN 1360
1340 IF I5 = 1 THEN 1380
1350 GOTO 1420
1360 GOSUB 1830
1370 GOTO 1340
1380 Y = Y - I4
1390 I3 = 1
1400 I4 = 1
1410 RETURN
1420 X = X - 1
1430 RETURN
1440 END
1450 B = X
1460 GOSUB 1960
1470 IF I5 = 1 THEN 1500
1480 IF I5 = 1 THEN 1520
1490 RETURN
1500 GOSUB 1830
1510 GOTO 1480
1520 Y = Y - I4
1530 I3 = 1
1540 I4 = 0
1550 RETURN
1560 END
1570 Y = Y + 1
1580 C = Y
1590 GOSUB 960
1600 IF I5 = 1 THEN 1640
1610 IF I5 = 1 THEN 1660
1620 Y = Y - 1
1630 RETURN
1640 GOSUB 1830
1650 GOTO 1610
1660 X = X - 1 + I4
1670 I3 = 0
1680 I4 = 0
1690 RETURN
1700 END
1710 C = Y
1720 GOSUB 1960
1730 IF I5 = 1 THEN 1760
1740 IF I5 = 1 THEN 1780
1750 RETURN
1760 GOSUB 1830
1770 GOTO 1740
1780 X = X - 1 + I4
1790 I3 = 0
```

# Publicações Recebidas

## PUBLICAÇÕES PERIÓDICAS

— AGROS
Associação dos Estudantes de Agronomia

— ANNALES DE MECÁNICA Y ELETRICIDAD
Asociation de Ingenieros del I. C. A. I.

— ASEA — REVUE

— ACTA TÉCHNICA
Academiae Scientiarum Hungaricae

— ANAIS DO CLUBE MILITAR NAVAL

— ANALYTICAL ABSTRACTS
Society for Analytical Chemistry

— ANNALES
institut Technique du Batiment et des Travaux Publics

— ACIER - STAHL - STELL

— AEG - TELEFUNKEN AL DIA

— AR COMPRIMIDO
Atlas Copco

— BOLETIM DA CÂMARA MUNICIPAL DE SÁ DA BANDEIRA

— BOLETIM ECONÓMICO E FINANCEIRO
Banco Borges e Irmão

— BOLETIM
Instituto Nacional de Investigação Industrial

— BOLETIM MENSAL DE INFORMAÇÃO
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

— BULLETIN OF THE SEISMOGRAPHIC STATIONS
University of California

— BOLETIM DEL CEMENTO PORTLAND
Instituto del Cemento Portland Argentino

— BOLETIM GTH
Gabinete técnico da Habitação da Câmara Municipal de Lisboa

— BOLETIM
Sociedade Geológica de Portugal

— BOLETÍN INFORMATIVO IRANOR
Instituto Nacional de Racioanlizacion y Normalizacion

— BOLETIM
Associação Industrial de Angola

— BULLETIN
Agence Internationale de L'energie Atomique

— BOLETIM DO PORTO DE LISBOA
Administração - Geral do Porto de Lisboa

— BOLETIM DO SERVIÇO CARTOGRÁFICO DO EXÉRCITO

— BOLETIM DE MINAS
Direcção Gera l de Minas e Serviços Geológicos

— BULLETIN DE LA CHAMBRE DE COMMERCE BELGE AU PORTUGAL

CORTIÇA
Instituto dos Produtos Florestais

— CENIM

Centro Nacional de Investigaciones Metalurgicas

— (JOURNAL OF) CHEMICAL EDUCATION
Division of Chemical Education of the American Chemical Society

— CIMENTO E CONCRETO
Associação Brasileira d e Cimento Portland

— COMUNICACIONES ELÉCTRICAS
International Telephone and Telegraph Corporation

— CONSTRUCI

— CARTA GEOLÓGICA DE ANGOLA
Direcção Provincial dos Serviços de Geologia e Minas

— CEMENTO HORMIGÓN

COURRIER CERN

— COLLECTION
Czechoslovak Academy of Sciences

— DYNA
Asociacion de Engenieros Industriales de España

— EL ESTAÑO Y SUS APLICACIONES
Tin Research Institute

— ELECTRICITE DE FRANCE
Direction des Etudes et Rechesches

— ELECTRICIDADE
Empresa Editorial Electrotécnica Edel, Lda.

— ENDEAVOUR
Imperial Chemical Industries Limited

— Estudos
Banco Fomento Nacional

—-ESTUDOS, NOTAS E TRABALHOS
Serviço de Fomento mieiro

— Electrical Telephone and Telegraphe Corporation

— ECONOMIC REVIEW
Câmara de Comércio Luso-Britanica

FUNDIÇÁO
Associação Portuguesa de Fundição

— FUNDEXPORT
Fundo de Fomento de Exportação

— GEOTÉCNICA
Revista da Sociedade Portuguesa de Geotécnica

— INFORMES DE LA CONSTRUCCIÓN
Instituto Eduardo Torroja

— ION
Sindicato Nacional de Industrias Químicas

— INDÚSTRIA DE MOÇAMBIQUE
Associação Industrial de Moçambique

— LA HOUILLE BLANCHE
Société Hydrotechnique de France

— LES NOUVELLES DE L'E. I. B.

— METALLURGIA AND METAL FORMING
National Association of drop Forger and Stampers

— MACHINE TOOL REVIEW

— NOTICIÁRIO DOS ELASTÔMEROS
du Pont

— ONU (CHRONIQUE MENSUELLE)
Service de L'information de L'organisation des Nations Unies

— O PROPULSOR
Sindicato Nacional dos Oficiais de Marinha Mercante

— PRELO
Imprensa Nacional - Casa da Moeda

— PORTUGAL - ALEMANHA
Câmara de comércio e Indústria Luso-Alemã

— REVUE LANDIS E GYR (EDITION ELECTRICITÉ)

— REVUE D'IENA

— REVUE SIMENS
Siemens Antiengesellschaft

— REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

— LA RECHERCHE AÉROSPATIALE
Office National D'Études et de Recherches Aérospatiales

— REVISTA DE METALURGIA
Cenim - Centro Nacional de Investigaciones Metalurgicas

— RAIL INTERNATIONAL
Association Internationale du congrès des chemins de fer et de L'Union Internationale des Chemins de fer

REVISTA TÉCNICA SULZER

— REVISTA DANFOSS

— REVISTA AGRONÓMICA
Sociedade de Ciências Agronómicas de Portugal

— TECHNIQUES FRANÇAISES (BATIMENT TRAVAUX PUBLICS URBANISME)
Services Économiques de L'Embassade de France

— TECHNIQUES FRANÇAISES (MECANIQUE HYDRAULIQUE INGENIERIE)
Serviçes Économiques de L'Embassade de France

— TECHNIQUES FRANÇAISES (INDUSTDIE DE METAUX)
Services Économiques de L'Embassade de France

— TECHNIQUES FRANÇAISES (TRANSPORTS)
Services Économiques de L'Embassade de France

— TECHNIQUES FRANÇAISES (CHIMIE GAZ PETROLE) BIENS DE CONSOMMATION)
Services Économiques de L'Embassade de France

— WORLD HEALTH ORGANIZATION PUBLICATIONS
World Health Organization

VICENTE FERREIRA E BRAZÃO FARINHA

# TABELAS TÉCNICAS

técnica

REVISTA DE ENGENHARIA DA ASSOCIAÇÃO DOS ESTUDANTES
DO INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO - LISBOA

7ª EDIÇÃO REVISTA E ACTUALIZADA
PREÇO 250.00
DESC. 10% AOS ASSINANTES

# Publicidade com critério.

# Anuncie na

**técnica** REVISTA DE ENGENHARIA